

11. Ободович, О. М. Дослідження процесу зневоднення мікробіологічних матеріалів в роторно-плівковому випарному апараті [Текст] / О. М. Ободович, С. І. Костик // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – Т. 6, № 8 (66). – С. 36–39. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/19126/17077>

References

1. Kafarov, V. V., Vynarov, A. Y., Gordeev, L. S. (1979). Modeling of biomechanic reactors. Moscow: Lesnaya Industriya, 334.
2. Viesturs, U. E., Kuznetsov, A. M., Savenkov, V. V. (1988). Systems of fermentation. Riga: Zinatne, 368.
3. Guidance ST-H Ministry of Health 42-4.0:2015 Medicines. Good Manufacturing Practice (2015). Ministerstvo ohorony zdorov'ja Ukrainy.
4. Kazenyn, D. A., Chapura, Y. V., Petrov, Y. A., Zhavoronkov, V. A. (2008). Hydrodynamics, mass transfer and energy in the cavity apparatus with stirrer. Theoretical Fundamentals of Chemical Technology, 42 (2), 128–134.
5. Sergeev, V. A., Sobko, Yu. A. (1990). Cell cultures in veterinary medicine and biotechnology. Kiev: Urozhay, 152.
6. Kolmogorov, A. N. (1941). The local structure of turbulence in an incompressible viscous fluid at very high Reynolds numbers. Rep. USSR Academy of Sciences, 30 (4), 299–303.
7. Kostyk, S. I., Ruzhinska, L. I., Shybetkyy, V. Y., Revtov, A. A. (2016). Mathematical simulation of hydrodynamics of the mixing device with magnetic drive. ScienceRise, 4/2 (21), 27–31. doi: 10.15587/2313-8416.2016.67275
8. Barabash, V. M., Begichev, V. I., Belevitskaya, M. A., Smirnov, N. N. (2007). Problems and tendencies of development of the theory and practice of mixing liquid media. Theoretical bases of the chemical technologies, 41 (2), 140–147.
9. Timkin, L. S. (2000). Measurement of local bubbles sliding speed in the uplink during pseudoturbulence. Thermophysics and Aeromechanics, 7 (1), 101–114.
10. Smolyakov, A. V., Tkachenko, V. M. (1980). Measurement of turbulent fluctuations. Leningrad: Energy, 264.
11. Obodovych, O. M., Kostyk, S. I. (2013). Investigation dehydration process microbiological materials in a rotary-film evaporator. Eastern-european journal of enterprise technologies, 6/8 (66), 36–39. Available at: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/19126/17077>

*Рекомендовано до публікації 0-р техн. наук Мельник В. М.
Дата надходження рукопису 19.04.2016*

Шибецький Владислав Юрійович, кандидат технічних наук, асистент, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: sjavva@mail.ru

Костик Сергій Ігорович, кандидат технічних наук, асистент, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: kostyksergey@ukr.net

Поводзинський Вадим Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: vpovodzinskiy@mail.ru

Кутовий Михайло Григорович, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: mishakutovoy@ukr.net

Закоморний Дмитро Миколайович, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: zakomorniy@gmail.com

УДК 006.91:004.942

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.69150

ЕКСПРЕС-МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ДЕФЕКТІВ БІМЕТАЛЕВИХ ВИЛИВКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИХОРОСТРУМОВОГО ЕФЕКТУ

© Г. О. Оборський, О. Л. Становський, І. В. Прокопович, О. В. Шмараєв, М. О. Духаніна

Проаналізовано проблеми, які виникають при вимірюванні ефективності зварюваності між сталевим і алюмінієвим елементами біметалевих виливків. Запропоновано метод та нове обладнання для такого вимірювання, що представляють собою комплекс тепловізора та вихорострумового дефектоскопа. Комплекс вбудований в систему управління технологічним процесом біметалевого лиття. Застосування методу в ливарному виробництві дозволило знизити брак лиття на 34 %

Ключові слова: система управління, вимірювання, зварюваність металів, біметалічні виливки, тепловізор, вихорострумний дефектоскоп

The problems arising when the effectiveness of weldability between steel and aluminium elements of bimetallic castings measuring were analyzed. The method and new equipment for such a measurement, which is a complex thermal and vortex-current detector, were proposed. The complex is built into the control system of bimetallic casting technological process. The application of the method in the foundry industry reduced the casting defects by 34 %

Keywords: control system, measurement, weldability of metals, bimetal castings, infrared imager, vortex-current detector

1. Вступ

Головним завданням при виготовленні біметалевих виливків є забезпечення найбільш глибокого контакту, в деякому сенсі «зварюваності» між їхніми елементами. Справа в тому, що гарантована зварюваність забезпечує головні експлуатаційні властивості майбутньої литої деталі: механічні, теплофізичні тощо. Ця проблема ще більш ускладнюється, коли в якості таких елементів виступають окремі частини виливка, виготовлені з металів, далеких один від одного за своїми фізико-хімічними властивостями, наприклад, сталі та алюмінію.

Складові цього завдання очевидні, але це не робить його легкорозв'язуваним: по-перше, необхідно чітко визначити параметри технології лиття для кожного конкретного біметалевого виливка та точно додержуватися цих параметрів в реальному часі реального виробництва і, по-друге, необхідно мати змогу отримувати поточні дані про наявність дефектів виливків та їхні геометричні параметри (розміри, місце розташування), необхідні для організації управління технологічним процесом за зворотним зв'язком.

Обидві складові потребують, у першу чергу, вдосконалення за методом та швидкодією метрологічного забезпечення процесу біметалевого лиття, адже все, що необхідно вимірювати для розв'язання поставлених завдань, як правило, або важкодоступне (знаходиться всередині деталі), або швидкоплинне (температурні поля остигаючого виливка).

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

«Зварюваність» між елементами біметалевих виливків може виникати, завдяки наступним фізичним явищам:

– механічне стискування, коли один елемент «обіймає» інший і обжимає його; таке явище виникає завдяки особливій конструкції конкретного біметалевого виливка (наприклад, труби) та тоді, коли зовнішній елемент має більш високий коефіцієнт термічного розширення [1];

– капілярне «зварювання», коли рідкий метал одного елемента просочує пори іншого і застигає там; таке явище можливе при змочуванні першим металом другого та відсутності плівок на поверхні обох металів [2];

– дифузійне або істинне зварювання, коли в деякому проміжному шарі між елементами, завдяки дифузії, утворюється фактично твердий розчин одного металу в іншому; такому явищу також можуть завадити поверхневі плівки.

В інших випадках між елементами біметалу утворюється порожнина, своєрідна «тріщина», яка, як

відомо, має нульові механічні властивості та дуже великий опір теплообміну між елементами [3, 4] (рис. 1).

Останнє стає значною перешкодою при використанні біметалевого виливка, наприклад, в якості опалювального обладнання (рис. 2).



Рис. 1. Порожнина між елементами біметалевого виливка



a



б

Рис. 2. Біметалевий виливок «секція радіатора опалення»: *a* – зовнішній вигляд та сталеві вставки; *б* – переріз

Існують різноманітні методи вимірювання якості зчеплення між елементами біметалевих виробів [5]. Особливістю такого вимірювання є те, що по суті мова йде про оцінку неелектричної величини – параметрів порожнини, заповненої газом [6]. Головні недоліки в

них – руйнівний контроль, та пов'язаний із ним великий час, що витрачається на таке вимірювання. Тому перехід до методів неруйнівного контролю [7, 8], серед яких найбільш поширені – це рентгенівський [9] та ультразвуковий [10] є лише першим кроком на шляху змен-

шення термінів експрес-контролю. Адже ці методи потребують дорогого обладнання та ретельної підготовки вимірюваних об'єктів.

В цьому сенсі звертає на себе увагу вихорострумний метод [11], суть якого ілюструє рис. 3.

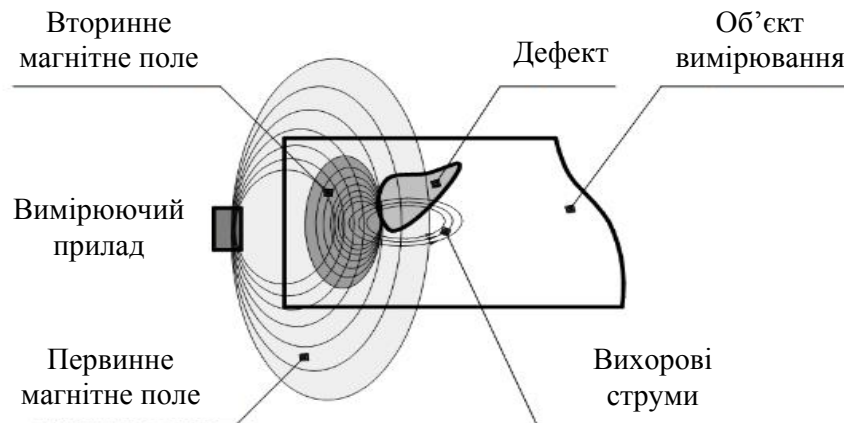


Рис. 3. Схема вимірювання параметрів прихованого дефекту за допомогою вихорострумного вимірюючого приладу

Якщо поруч з металевим об'єктом створити змінне магнітне поле, всередині матеріалу об'єкта індукуються вихрові струми (струми Фуко). Вихрові струми, в свою чергу, також створюють магнітне поле, яке протидіє зовнішньому магнітному впливу (рис. 3) [7]. Якщо всередині матеріалу об'єкта є недосконалість (тріщини, порожнини, інші дефекти), то це вплине на конфігурацію вихрових струмів, і, отже, на параметри створюваного ними магнітного поля. Фіксуючи ці зміни, можна отримати інформацію про внутрішні дефекти об'єкта [12].

До переваг методу відносять відносно високу швидкість і високу точність вимірювання.

Важливою обставиною для нашого прикладу є те, що вихорострумний метод застосовують для внутрішнього контролю біметалевих труб [13], діаметром від 0,8 мм [14] до кількох метрів [15], що дуже важливо при виготовленні біметалевих радіаторів опалення. В той же час, особливості конструкції та технології виготовлення останніх породжують такі метрологічні проблеми:

- необхідність вимірювання інтегральної температури металевих поверхонь у вигляді зорового образу та згортки цього образу до єдиного числа, зручного для використання в рамках АСУ;

- вимірювання дефектів зсередини біметалевого виливка потребує особливого вимірювального пристрою, якій міг би проникати і рухатися скрізь довгі канали невеликого діаметру;

- необхідність вимірювання усіх параметрів в онлайн режимі технологічного процесу біметалевого лиття.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є зниження відсотку бракованих біметалевих виливків за «незварюваністю» між їхніми елементами шляхом розробки та впроваджен-

ня в систему управління технологічним процесом швидкодіючого неруйнівного методу вимірювання «зварюваності», заснованого на тепловізійних та вихорострумних фізичних методах отримання первинної вимірюваної інформації.

Для досягнення цієї мети в роботі були розв'язані такі задачі:

- запропоновано метод попереднього вимірювання термічних умов біметалевого лиття шляхом визначення коефіцієнту рівномірності нагріву поверхні сталеві трубочасті вставки за допомогою тепловізора та згортки тепловізійного зображення до числа;

- запропоновано метод попереднього вимірювання теплового потоку від зовнішньої алюмінієвої поверхні біметалевої деталі шляхом визначення коефіцієнту рівномірності нагріву цієї поверхні за допомогою тепловізора та згортки тепловізійного зображення до числа;

- запропоновано метод та вихорострумний прилад для вимірювання ступеня «незварюваності» елементів біметалевої деталі зсередини тонких та довгих каналів.

4. Метод вимірювання дефектів біметалевих виливків типу «незварюваності» їхніх елементів

4.1. Попереднє вимірювання термічних умов біметалевого лиття за допомогою тепловізора

Важливою характеристикою процесу, яка суттєво впливає на зварюваність, є температура попереднього підігріву сталеві трубочасті вставки перед її заливанням алюмінієм. З точки зору геометричних параметрів можливих дефектів має значення не стільки абсолютна температура вставки, скільки її рівномірність. Температури елементів біметалевого виливка під час виробництва останнього відносно невеликі, принаймні, вони не випроміню-

ють видиме світло. А для первинної обробки інфрачервоного випромінювання не підходять звичайні відеокамери, тому у даному випадку використовували тепловізор, з якого виходить первинне кольорове цифрове зображення підігрітої вставки, приклад якого наведено на рис. 4.

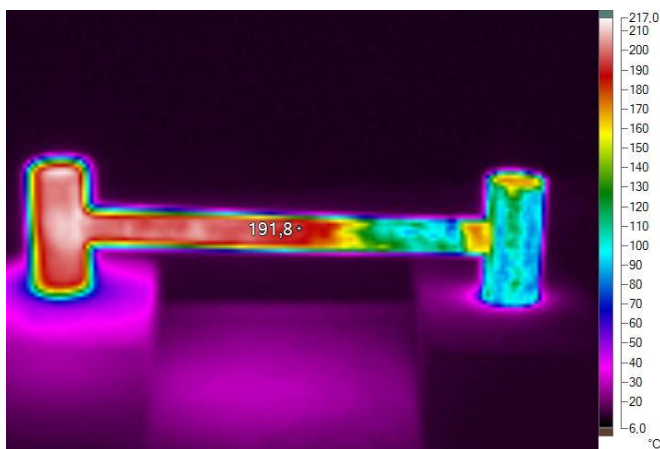


Рис. 4. Тепловізійне зображення підігрітої сталеві вставки

Головні метрологічні характеристики методу, що дозволяють порівнювати його із аналогами [16–18], такі:

Мінімальна вимірювана зміна інтенсивності випромінювання. Експериментально встановлено, що метод розпізнає різні випромінювання, що відрізняються середньою температурою відповідного пікселя в 0,01 К.

Мінімальний вимірюваний поріг зрушення теплової картини без зміни інтенсивності. Експериментально встановлено, що метод розпізнає як різні випромінювання, що відрізняються в просторі на 1 піксель на матриці тепловізора, що відповідає 0,07 К.

Погришність вимірювання. Запропонований метод відноситься до непрямих з великою кількістю перетворень вимірюваної величини від об'єкта вимірювань до його результатів. Це призводить до накопичення похибки на кожному етапі перетворень [19, 20]. Але сумарна максимально можлива помилка припустима (до 8 %) в цій сфері ливарного виробництва.

Порівняння метрологічних характеристик засобу вимірювання температури поверхні вставки для прототипу (вимірювання термпарою в точці) і запропонованого методу наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльні метрологічні характеристики засобу вимірювання

Характеристика	Прототип (вимірювання температури в одній точці)	Пропонований метод (вимірювання інтегральної температури)
чутливість	10±1 °C	1±0,5 °C
поріг чутливості:		
– по температурі	5 °C	1,1 °C
– по часу	15 с	0,5 с
діапазон показань	50–500 °C	50–500 °C
діапазон вимірювань	50–200 °C	50–200 °C
похибка	±20 %	±8 %

У запропонованому методі первинна метрологічна інформація, одержувана від тепловізора у вигляді плоского зображення, піддається надалі еліптичному перетворенню [21], яке згортає значення інтенсивностей кожного пікселя зображення до одного числа, яке дозволяє оцінити рівномірність нагрівання поверхні.

4. 2. Вимірювання теплового потоку від поверхні біметалевої деталі за допомогою тепловізора

Зберігаючи перелічені вище характеристики методу, а також враховуючи ті ж самі параметри та діапазони інфрачервоного випромінювання (50–200 °C), для вимірювання теплового потоку від алюмінієвої поверхні біметалевої деталі також використовували тепловізор.

Таке тепловізійне вимірювання здійснювали вже з готового біметалевого виливка, після того як його було вибито з прес-форми. Вимірювання виконували під час остигання виливка з 200 °C до 50 °C, тобто до того, як його температура зрівняється із температурою навколишнього середовища. При цьому, якщо виливок бракований, і між його елементами існує щілина, саме в місці розташування цієї щілини температура поверхні буде вищою за інші його ділянки, оскільки вона охолоджується повільніше, що добре видно на рис. 5.

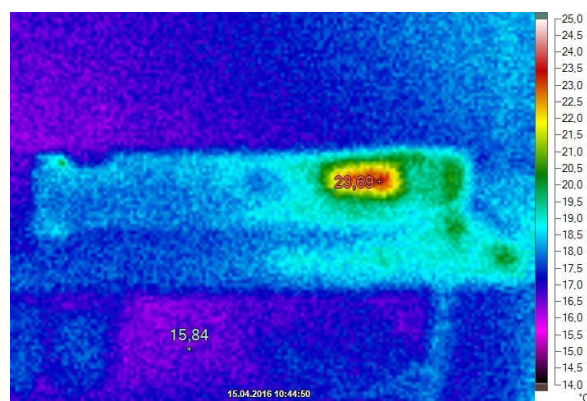


Рис. 5. Зовнішнє тепловізійне зображення біметалевої секції радіатора при остиганні останньої до температури 20 °C

Наявність «гарячих» плям на тепловізійному зображенні поверхні біметалевого виливка не тільки свідчить про нерівномірність охолодження останнього, але й досить точно вказує місце, де слід шукати «незварюваність» його елементів. Остання інформація може використовуватися с двома цілями: поперше, вона запускає більш точний метод пошуку відповідних щілин, і, по-друге, скорочує площу вимірювання, суттєво знижуючи при цьому його час.

4.3. Вимірювання «незварюваності» елементів за допомогою вихорострумового ефекту

Для вимірювання ступеня «зварюваності» використовували безрозмірну одиницю

$$Z = (S_{\text{заг}} - S_{\text{незв}}) / S_{\text{заг}}, \quad (1)$$

де $S_{\text{незв}}$ – площа дефекту; $S_{\text{заг}}$ – загальна внутрішня площа деталі, значення якої безпосередньо вимірюється на готовому виробі за схемою, наведеною на рис. 6.

В якості високочастотної вимірюючої головки використовували магнітофонну головку із збільшеною шириною зазору [22], розроблену та повірену за правилами перевірки засобів вимірювальної техніки фізичних величин [23].

У підсумку, загальна схема організації управління процесом лиття біметалевих виливків із вбудованим вимірювальним комплексом неруйнівного контролю виглядає наступним чином (рис. 7).

Тепловізори 1 та 2 визначають рівномірність розподілу температури, відповідно, поверхні вставки та виробу в цілому. Якщо еліптичні згортки тепловізійного зображення знаходяться в межах допуску, вихорострумове вимірювання не запускається, на чому економиться значний час.

В протилежному випадку за допомогою вихорострумового прибору (рис. 6) формується сигнал, який поступає до каналу зворотного зв'язку системи управління.

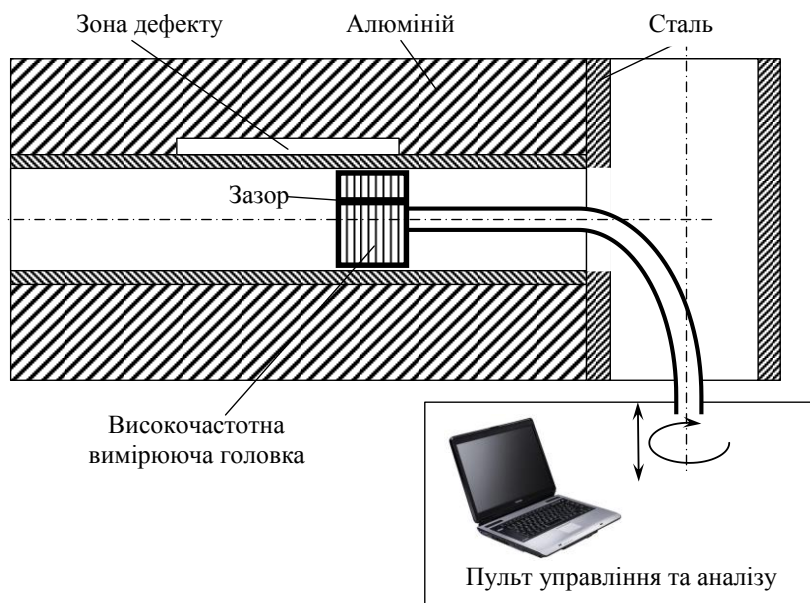


Рис. 6. Конструктивна схема прибору та процесу вимірювання ступеня «незварюваності» за допомогою вихорострумового методу

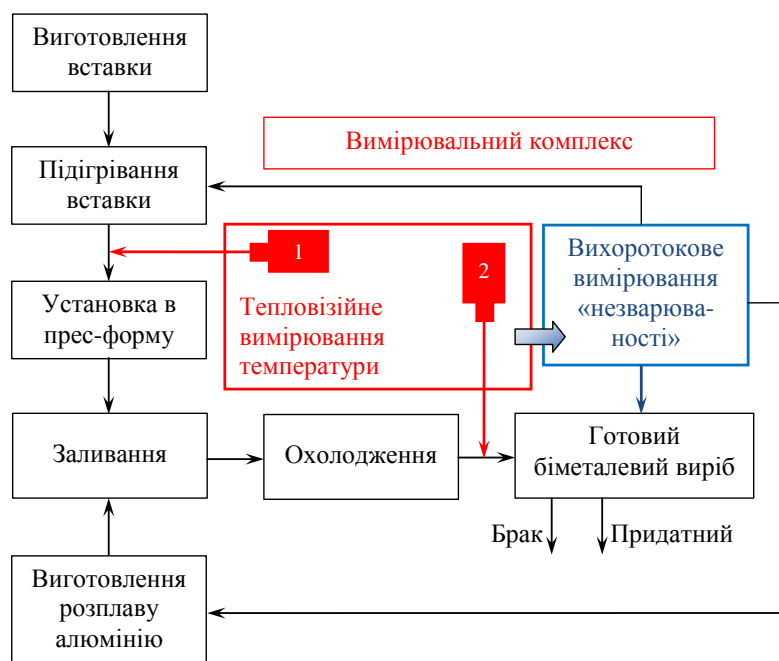


Рис. 7. Схема організації управління процесом лиття біметалевих виливків із вбудованим вимірювальним комплексом неруйнівного контролю

5. Результати дослідження

В результаті дослідження створено вимірювальний комплекс із адаптивною структурою, який дозволяє швидко, в реальному часі управління технологічним процесом вимірювати стан «зварюваності» між елементами композиційного виливка, застосовуючи при цьому мінімально необхідний перелік вимірюваної техніки.

В ливарному цеху ДП «Інженерний виробничо-науковий центр лиття під тиском» були проведені випробування запропонованого методу вимірювання. В якості об'єкта випробування використовували технологічний процес лиття біметалевих сталь-алюмінієвих виливків «Секція радіатора» під тиском в металеві форми. Встановлено, що застосування розробленого метрологічного забезпечення в реальному виробництві дало можливість знизити дефекти виливків на 34 % від загального відсотка браку лиття.

6. Висновки

1. Запропоновано метод попереднього вимірювання термічних умов біметалевого лиття, зокрема, температури поверхні сталеві вставки та алюмінієвої частини готового виливка шляхом визначення коефіцієнту рівномірності нагріву цих об'єктів за допомогою тепловізора та згортки тепловізійного зображення до числа.

2. Запропоновано та впроваджено у виробництво метод та вихорострумовий прилад для вимірювання ступеня «зварюваності» елементів біметалевої деталі.

3. Запропонована та впроваджена у виробництво схема організації управління процесом лиття біметалевих виливків із вбудованим вимірювальним комплексом неруйнівного контролю

Література

1. Стерин, И. С. Машиностроительные материалы. Основы металловедения и термической обработки [Текст] / И. С. Стерин. – СПб.: Политехника, 2003. – 344 с.
2. Saenko, V. Ya. Peculiarities of bimetal material quality estimation [Text] / V. Ya. Saenko, L. B. Medovar, B. B. Fedorovsky, N. T. Shevchenko, V. M. Yarosh, V. V. Zhukov et al // *Advances in Electrometallurgy. International Scientific-Theoretical and Production Journal.* – 2006. – Issue 1. – P. 2–7.
3. O'Loughlin, E. Heat transfer across a gap – with relevance to analysis of concrete-filled steel tubes in fire [Text]: conference / E. O'Loughlin, D. Rush, L. Bisby // *Edinburgh Research Explorer Concrete-Filled Structural Hollow Sections in Fire: Accounting for Heat Transfer across a Gap.* – 2012. – P. 1–17.
4. Bejan, A. Heat Transfer [Text] / A. Bejan. – New York: John Wiley and Sons, 2003. – 1496 p.
5. Савельева, О. С. Розробка методів вимірювання якості зчеплення між елементами сталєво-алюмінієвих виливків [Текст] / О. С. Савельева, І. В. Прокопович, О. В. Шмараяв, М. О. Духаніна, С. В. Кошулян, І. А. Саух // *Технологічний аудит та резерви виробництва.* – 2016. – Т. 1, № 2 (27). – С. 68–73. doi: 10.15587/2312-8372.2016.59836
6. Оборський, Г. О. Вимірювання неелектричних величин [Текст] / Г. О. Оборський, П. Т. Слободяник. – К.: Наука і техніка, 2005. – 200 с.
7. Неразрушающий контроль. Справочник. Кн. 1, Кн. 2: Вихретоковый контроль [Текст]. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.

8. Методы дефектоскопии отливок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://delta-grup.ru/bibliot/15/81.htm>

9. Радиографический метод контроля сварных соединений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://taina-svarki.ru/kachestvo-i-kontrol-svarki/kontrol-svarnyh-soedineniy/radiograficheskiy-kontrol-svarnyh-shvov-ch1-kontrol-rentgenom.php>

10. Drury, J. C. Ultrasonic Flaw Detection for Technicians [Text] / J. C. Drury. – UK: Silverwing Ltd., 2004. – 250 p.

11. А. с. (СССР) № 1118909, G 01 N 27/90. Вихретоковый накладной преобразователь [Текст] / Сапунов В. М., Беда П. И., Сурков Э. П. – опубл. 15.10.1984; Бюл. № 38.

12. Чжун, Я. Физическое и математическое моделирование измерительных преобразований в полях вихревых токов [Текст] / Я. Чжун // *Вестник Науки Сибири.* – Томск, 2013. – № 3 (9). – С. 75–85.

13. Гольдштейн, А. Е. Контроль внутреннего диаметра труб вихретоковым методом [Текст] / А. Е. Гольдштейн, В. Ф. Булгаков. – М.: Неразрушающий контроль, 2013. – 9 с.

14. Пат. № 2040788, G 01 N 27/90. Вихретоковый датчик для неразрушающего контроля металлизации отверстий и трубок и способ его изготовления [Текст] / Улитин Ю. М., Горская Л. Е. – 93025817/28. – заявл. 29.04.1993; опубл. 25.07.1995.

15. Пат. № 2516364, G 01 N 27/90. Комплекс дефектоскопии технологических трубопроводов [Текст] / Петров В. В., Бакурский Н. Н., Филатов А. А., Бакурский А. Н., Соловых И. А. // Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/251/2516364.html>

16. Назаров, Н. Г. Метрология. Основные понятия и математические модели [Текст] / Н. Г. Назаров. – М.: Высшая школа, 2002. – 348 с.

17. Колчков, В. И. Метрология, стандартизация и сертификация [Текст] / В. И. Колчков. – М.: Владос, 2010. – 398 с.

18. Бирюков, С. В. Метрология: Тексты лекций [Текст] / С. В. Бирюков, А. И. Чередов // Библиотека Гумер. – Режим доступа: http://www.gumer.info/bibliotek_Buks/Science/biruk/03.php

19. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 232 с.

20. Погрешность измерения [Электронный ресурс]. – Википедия. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/%CF%E3%F0%E5%F8%ED%EE%F1%F2%FC>

21. Савельева, О. С. Разработка метрологического обеспечения системы управления технологическим процессом лития под давлением биметаллических отливок [Текст] / О. С. Савельева, И. В. Прокопович, А. В. Шмараяв // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – 2015. – Т. 2, № 1 (74). – С. 32–38. doi: 10.15587/1729-4061.2015.40062

22. Сачковский, В. Ферритовые магнитные головки для звукозаписи и особенности их применения [Текст] / В. Сачковский // *Радио.* – 1998. – № 5.

23. Гугнін, В. П. Метрологічне забезпечення та перевірка засобів вимірювальної техніки фізичних величин [Текст] / В. П. Гугнін, Г. О. Оборський. – К.: Наука і техніка, 2011. – 220 с.

References

1. Sterin, I. S. (2003). *Mashinostroitel'nye materialy. Osnovy metallovedeniya i termicheskoy obrabotki.* Sankt-Peterburg: Politehnika, 344.
2. Saenko, V. Ya., Medovar, L. B., Fedorovsky, B. B., Shevchenko, N. T., Yarosh, V. M., Zhukov, V. V. et al (2006). Peculiarities of bimetal material quality estimation. *Advances in Electrometallurgy. International Scientific-Theoretical and Production Journal*, 1, 2–7.

3. O'Loughlin, E., Rush, D., Bisby, L. (2012). Heat transfer across a gap – with relevance to analysis of concrete-filled steel tubes in fire. *Edinburgh Research Explorer Concrete-Filled Structural Hollow Sections in Fire: Accounting for Heat Transfer across a Gap*, 1–17.
4. Bejan, A. (2003). *Heat Transfer*. New York: John Wiley and Sons, 1496.
5. Savjel'jeva, O. S., Prokopovych, I. V., Shmarajev, O. V., Duhanina, M. O., Koshuljan, S. V., Sauh, I. A. (2016). Development of the methods of coupling quality measurement between steel-aluminium castings elements. *Technology audit and production reserves*, 1/2 (27), 68–73. doi: 10.15587/2312-8372.2016.59836
6. Obors'kyj, G. O., Slobodjanyk, P. T. (2005). *Vymirjuvannja neelektrychnyh velychyn*. Kyiv: Nauka y tehnika, 200.
7. Nerazrushajushhij kontrol'. *Spravochnik*. Kn. 1, Kn. 2: *Vihretokovyj kontrol'* (2003). Moscow: Mashinostroenie, 688.
8. *Metody defektoskopii otlivok*. Available at: <http://delta-grup.ru/bibliot/15/81.htm>
9. *Radiograficheskij metod kontrolja svarnyh soedinenij*. Available at: <http://taina-svarki.ru/kachestvo-i-kontrol-svarki/kontrol-svarnyh-soedineniy/radiograficheskij-kontrol-svarnyh-shvov-ch1-kontrol-rentgenom.php>
10. Drury, J. C. (2004). *Ultrasonic Flaw Detection for Technicians*. UK: Silverwing Ltd., 250.
11. Sapunov, V. M., Beda, P. I., Surkov, Je. P. (1984). A. s. (SSSR) № 1118909, G 01 N 27/90. *Vihretokovyj nakladnoj preobrazovatel'*. opubl. 15.10.1984; Bjul. № 38.
12. Chzhun, Ja. (2013). *Fizicheskoe i matematicheskoe modelirovanie izmeritel'nyh preobrazovanij v poljah vihrevykh tokov*. *Vestnik Nauki Sibiri*. Tomsk, 3 (9), 75–85.
13. Gol'dshtejn, A. E., Bulgakov, V. F. (2013). *Kontrol' vnutrennego diametra trub vihretokovym metodom*. Moscow: *Nerazrushajushhij kontrol'*, 9.
14. Ulitin, Ju. M., Gorskaja, L. E. (1993). Pat. № 2040788, G 01 N 27/90. *Vihretokovyj datchik dlja nerazrushajushhego kontrolja metallizacii otverstij i trubok i sposob ego izgotovlenija*. 93025817/28. zajavl. 29.04.1993; opubl. 25.07.1995.
15. Petrov, V. V., Bakurskij, N. N., Filatov, A. A., Bakurskij, A. N., Solovyh, I. A. Pat. № 2516364, G 01 N 27/90. *Kompleks defektoskopii tehnologicheskikh truboprovodov*. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/251/2516364.html>
16. Nazarov, N. G. (2002). *Metrologija. Osnovnye ponjatija i matematicheskie modeli*. Moscow: Vysshaja shkola, 348.
17. Kolchikov, V. I. (2010). *Metrologija, standartizacija i sertifikacija*. Moscow: Vlados, 398.
18. Birjukov, S. V., Cheredov, A. I. *Metrologija: Teksty lekcij*. Biblioteka Gumer. Available at: http://www.gumer.info/bibliotek_Buks/Science/biruk/03.php
19. Novickij, P. V., Zograf, I. A. (1991). *Ocenka pogreshnostej rezul'tatov izmerenij*. Leningrad: Jenergoatomizdat, 232.
20. *Pogreshnost' izmerenija*. Vikipedija. Available at: <http://ru.wikipedia.org/wiki/%CF%E3%F0%E5%F8%ED%EE%F1%F2%FC>
21. Savel'eva, O. S., Prokopovich, I. V., Shmarajev, A. V. (2015). Development of metrological support of process control system of injection molding of bimetallic castings. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2/1 (74), 32–38. doi: 10.15587/1729-4061.2015.40062
22. Sachkovskij, V. (1998). *Ferritovye magnitnye golovki dlja zvukozapisi i osobennosti ih primenenija*. Radio, 5.
23. Gugin, V. P., Obors'kyj, G. O. (2011). *Metrologichne zabezpechennja ta povirka zasobiv vymirjuval'noi' tehniky fizychnyh velychyn*. Kyiv: Nauka i tehnika, 220.

Дата надходження рукопису 05.04.2016

Оборський Геннадій Олександрович, доктор технічних наук, професор, кафедра металорізальних верстатів, метрології та сертифікації, Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044
E-mail: rector@oru.ua

Становський Олександр Леонідович, доктор технічних наук, професор, кафедра нафтогазового та хімічного машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044
E-mail: stanovsky@mail.ru

Прокопович Ігор Валентинович, доктор технічних наук, доцент, кафедра технологій та управління ливарними процесами, Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044
E-mail: igor.prokopovich@gmail.com

Шмарасв Олександр Васильович, кафедра металорізальних верстатів, метрології та сертифікації, Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044
E-mail: schmarasv@gmail.com

Духаніна Маріанна Олександрівна, кафедра інформаційних технологій проектування в машинобудуванні, Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044
E-mail: marianna.dukhanina@gmail.com