

УДК 699.887.3; 546.296

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ЗАЩИТЕ РАБОТНИКОВ СПЕЦПОДРАЗДЕЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ ПО ТЕПЛОВОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

БЕЛИКОВ А. С.^{1*}; *д.т.н., проф.*,
СТРЕЖЕКУРОВ Э. Е.^{2**}; *к.т.н., доц.*,
РАГИМОВ С. Ю.³; *к.т.н.*,
ШАЛОМОВ В. А.⁴; *к.т.н., доц.*,
КОРДУНОВ С. П.⁵; *соискатель.*

^{1*} Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Кафедра электротехнологии и электромеханики, Днепродзержинский государственный технический университет, ул. Днепропетровская 2, 51918, Днепродзержинск, Украина, тел. +38 (0569) 55-20-05, e-mail: strejekyrov@vandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-4304-3556

³ Кафедра организации и технического обеспечения аварийно-спасательных работ Национальный университет гражданской защиты Украины, ул. Чернышевского 94, 61023, Харьков, Украина, тел +38 (057) 370-50-52, e-mail: sergragimov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0572-4465

⁴ Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: shalomov_v_a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

⁵ Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: s_cordunov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-5069-4731

Аннотация. Цель. Разработка средств контроля, испытания теплозащитных материалов используемых для изготовления средств индивидуальной защиты (СИЗ) как существующих, так и на стадии создания новых. **Методика.** В настоящее время существуют методы испытания материалов с полимерным покрытием для специальной одежды: ГОСТ 12.4.058-84 ССБТ. «Материалы с полимерным покрытием для специальной одежды. Номенклатура показателей качества»; ГОСТ 12.4.103-83 ССБТ. «Одежда специальная защитная. Средства индивидуальной защиты ног и рук. Классификация»; ГОСТ Р 12.4.237-2007 ССБТ. «Одежда специальная. Методы испытания материала при воздействии брызг расплавленного металла». **Результаты.** Установлено, что существующие методы и приборы отечественного и зарубежного производства не позволяют исследовать теплозащитные материалы для создания и изготовления СИЗ и верхней защитной одежды для работы в экстремальных условиях при воздействии высоких тепловых потоков и частиц раскаленного металла (искр). В основных методах испытания материалов на искростойкость положены два способа, более ранний - в рамку зажимается испытуемый образец, вблизи его поверхности проводится электросварка в виде движения электрода вдоль испытуемого образца. Частицы расплавленного металла попадают на испытуемую поверхность и оставляют следы в виде прожогов, прилиплих частиц. Исследуются глубина прожога, степень прилипаемости и другое. В настоящее время применяется более прогрессивный метод, использующий расплавление сварочного электрода с одновременным дутьем в направлении поверхности испытуемого материала. К сожалению, оба способа позволяют получить раскаленные капли разных размеров, разного веса, разного направления относительно исследуемого материала и неконтролируемой температуры нагрева раскаленной капли, что снижает достоверность результатов исследования. **Научная новизна.** Впервые предложен новый метод, позволяющий дополнить существующие и получить более достоверные результаты. С учетом недостатков существующих методов предложен более совершенный метод и проект установки для испытания теплозащитных материалов. Создано устройство, позволяющее контролировать размеры капли, кинетическую энергию удара, направление полета и температуру раскаленной частицы. **Практическая значимость.** Результаты математического моделирования с известными допущениями позволили определиться с областью существования задачи, и методом ее практического решения, определить в масштабе время остывания частицы раскаленного металла, и определить параметры технического задания на разработку установки, позволяющей исследовать характеристики, обрабатывать образцы теплозащитных материалов, частицами раскаленного металла, задавая их размерами, температурой нагрева и скоростью удара об образец. Это позволит исследовать существующие искростойкие теплозащитные материалы и создавать новые с лучшими характеристиками.

Ключевые слова: Средства защиты индивидуальные, одежда специальная, сварка, капли расплавленного металла, метод испытаний металла

РІШЕННЯ ЗАДАЧ ЩОДО ЗАХИСТУ ПРАЦІВНИКІВ СПЕЦПІДРОЗДІЛІВ В УМОВАХ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИТУАЦІЙ З ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ

БЕЛІКОВ А. С.^{1*}; *д.т.н., проф.*,
 СТРЕЖЕКУРОВ Е. Є.²; *к.т.н., доц.*,
 РАГІМОВ С. Ю.³; *к.т.н.*,
 ШАЛОМОВ В. А.⁴; *к.т.н., доц.*,
 КОРДУНОВ С. П.⁵; *здобувач.*

^{1*} Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Кафедра електротехнології та електромеханіки, Дніпродзержинський державний технічний університет, вул. Дніпробудівська 2, 51918, Дніпродзержинськ, Україна, тел. +38 (0569) 55-20-05, e-mail: strejkyrov@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-4304-3556

³ Кафедра організації і технічного забезпечення аварійно-рятувальних робіт Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевського 94, 61023, Харків, Україна, тел. +38 (057) 370-50-52, e-mail: sergragimov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0572-4465

⁴ Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: shalomov_v_a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

⁵ Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: s_cordunov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-5069-4731

Анотація. Мета Розробка засобів контролю, випробування теплозахисних матеріалів використовуються для виготовлення засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) як існуючих, так і на стадії створення нових. **Методика.** В даний час існують методи випробування матеріалів з полімерним покриттям для спеціального одягу: ГОСТ 12.4.058-84 ССБП. «Матеріали з полімерним покриттям для спеціального одягу. Номенклатура показників якості»; ГОСТ 12.4.103-83 ССБП. «Одяг спеціальний захисний. Засоби індивідуального захисту ніг і рук. Класифікація»; ГОСТ Р 12.4.237-2007 ССБП. «Одяг спеціальний. Методи випробування матеріалу при впливі бризок розплавленого металу». **Результати.** Встановлено, що існуючі методи і прилади вітчизняного та зарубіжного виробництва не дозволяють досліджувати теплозахисні матеріали для створення і виготовлення ЗІЗ і верхнього захисного одягу для роботи в екстремальних умовах при дії високих теплових потоків і частинок розпеченого металу (іскор). В основних методах випробування матеріалів на іскростійкість покладені два способи, більш ранній - в рамках затискається випробуваний зразок, поблизу його поверхні проводиться електрозварювання у вигляді руху електрода уздовж випробуваного зразка. Частинки розплавленого металу потрапляють на випробувану поверхню і залишають сліди у вигляді прожогів, частинок, що прилипили. Досліджуються глибина прожога, ступінь прилипаємості та інше. В даний час застосовується більш прогресивний метод, що використовує розплавлення зварювального електрода з одночасним дуттям в напрямку поверхні випробуваного матеріалу. На жаль, обидва способи дозволяють отримати розпечені краплі різних розмірів, різної ваги, різного напрямку щодо досліджуваного матеріалу і неконтрольованої температури нагріву розпеченої краплі, що знижує достовірність результатів дослідження. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано новий метод, що дозволяє доповнити існуючі і отримати більш достовірні результати. З урахуванням недоліків існуючих методів запропонований більш досконалий метод і проект установки для випробування теплозахисних матеріалів. Створено пристрій, що дозволяє контролювати розміри краплі, кінетичну енергію удару, напрямок польоту і температуру розпеченої частинки. **Практична значущість.** Результати математичного моделювання з відомими допущеннями дозволили визначитися з областю існування завдання, і методом її практичного вирішення, визначити в масштабі час охолодження частинки розпеченого металу, і визначити параметри технічного завдання на розробку установки, що дозволяє досліджувати характеристики, обробляти зразки теплозахисних матеріалів, частками розпеченого металу, задаючись їх розмірами, температурою нагріву і швидкістю удару о зразок. Це дозволить дослідити існуючі іскростійкі теплозахисні матеріали і створювати нові з кращими характеристиками.

Ключові слова: Засоби захисту індивідуальні, одяг спеціальний, зварювання, краплі розплавленого металу, метод випробувань металу

MEET THE CHALLENGES OF THE PROTECTION OF EMPLOYEES OF THE SPECIAL DIVISION IN EXTREME SITUATIONS BY HEAT EXPOSURE

BIELIKOV A. S.^{1*}; *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
 STREZHEKUROV Ye. E.²; *Cand. Sc. (Tech.), Associate Prof.*,
 RAHIMOV S. Yu.³; *Cand. Sc. (Tech.)*,
 SHALOMOV V. A.⁴; *Cand. Sc. (Tech.), Associate Prof.*,
 KORDUNOV S.P.⁵; *Postgraduate*

^{1*} Department of Life Safety, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo st., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, phone +38 (0562) 47-16-01, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Department of electrotechnology and electromechanics, Dneprodzerzhinsk State Technical University, st. Dniprobudivska 2, 51918, Dniprodzerzhinsk, Ukraine, phone +38 (0569) 55-20-05, e-mail: strejkyrov@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-4304-3556

³ Department of Organization and technical support rescue operations National University of Civil Defence of Ukraine, st. Chernyshevsky 94, Kharkiv, 61023, Ukraine, phone +38 (057) 370-50-52, e-mail: sergragimov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0572-4465

^{4***} Department of Life Safety, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, phone +38 (0562) 47-16-01, e-mail: shalomov_v_a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

⁵ Department of Life Safety, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo st., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, phone +38 (0562) 47-16-01, e-mail: s_cordunov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-5069-4731

Abstract. Purpose The development of controls, testing thermal protection materials used for the manufacture of personal protective equipment (PPE) as the existing ones, and at the stage of creating new ones. **Method.** Currently, there are methods of testing materials with a polymer coating for special clothing that legalized GOST 12.4.058-84 OSSS. "Materials coated for special clothing. Nomenclature of quality"; GOST 12.4.103-83 OSSS. "Protective overalls. Personal protective feet and hands. Classification"; GOST R 12.4.237-2007 OSSS. "Wear a special. Methods of testing the material under the influence of the molten metal spray". **Results.** It has been established that the existing methods and tools of domestic and foreign production not allow us to study heat-proof materials for the creation and production of PPE and the upper protective clothing for extreme conditions when exposed to high heat fluxes and hot metal particles (sparks). The main methods of testing materials for resistance to sparks on two way earlier - in a frame is clamped test specimen near the surface electric welding is carried out in the form of movement of the electrode along the test specimen. The particles of molten metal fall on the test surface and leave traces in the form of a burn-through adhering particles. Explore the depths of burn, the degree of adhesion, and more. Currently used in more progressive method using molten weld electrode with simultaneous blowing in the direction of the surface of the material being tested. Unfortunately, both methods provide an incandescent drops of different sizes, different weights, different direction with respect to the test material, and uncontrolled heating temperature of a hot drop, which reduces the reliability of the results of the study. **Scientific novelty.** For the first time proposed a new method to complement existing and obtain more reliable results. Given the drawbacks of existing methods proposed an improved method and installation project for testing thermal protection materials. It created a device that allows you to control the size of droplets, the kinetic energy of impact, the direction of flight and the temperature of a hot particle. **Practical meaningfulness.** The results of mathematical modeling with known assumptions allowed to determine the scope of the problem of existence, and the method of its practical solutions at a scale to determine the cooling time of hot metal particles and determine the parameters of the terms of reference for the development of the installation, allowing to explore the characteristics, processing the samples heat-shielding materials, particles of hot metal, asking their size, the heating temperature and the speed of impact of the specimen. This will examine the current resistant to sparks heat-proof materials and create new ones with better performance.

Keywords: Individual protection means, special clothes, welding, droplets of molten metal, the metal test method

Введение

Важными задачами защиты работников спецподразделений при ликвидации стихийных бедствий и пожаров является обеспечение их средствами защиты. К общим СИЗ относятся спецодежда и обувь способные противостоять воздействию высокой температуры, тепловому облучению и воздействию раскаленных искр.

Цель

Обеспечение безопасной жизнедеятельности работников спецподразделений в условиях экстремальных ситуаций с повышенным тепловым излучением.

Методика

В настоящее время существуют методы испытания материалов с полимерным покрытием для специальной одежды: ГОСТ 12.4.058-84 Система стандартов безопасности труда. «Материалы с полимерным покрытием для специальной одежды. Номенклатура показателей качества.»; ГОСТ 12.4.103-83 Система стандартов безопасности труда.

«Одежда специальная защитная. Средства индивидуальной защиты ног и рук. Классификация.»; ГОСТ Р 12.4.237-2007 Система стандартов безопасности труда. «Одежда специальная. Методы испытания материала при воздействии брызг расплавленного металла».

Результаты

В основу метода испытания положены два способа [3, 5-7]. По первому способу в рамку зажимается испытуемый образец, вблизи его поверхности проводится электросварка. Частицы расплавленного металла попадают на испытуемую поверхность и оставляют следы в виде прожогов, прилипших частиц. Исследуются глубина прожога, степень прилипаемости и пр. В настоящее время применяется более прогрессивный метод с расплавлением сварочного электрода и дутьем на поверхность испытуемого материала [9, 11].

При этом оба способа имеют недостатки, т.е. позволяют получить раскаленные капли разных размеров, разного веса, разного направления относительно исследуемого материала и неконтролируемой температуры нагрева раскаленной

капли, что не позволяет получить высокую достоверность результатов исследования. Нами предлагается создать устройство позволяющее контролировать как размер капли, кинетическую энергию удара, направление полета и температуру раскаленной частицы [8].

Все вышесказанное и определило направление работы по созданию методики исследования исходных параметров и создание установки, которая обеспечивала бы постоянство таких параметров, как масса, скорость полета, температура и траектория полета нагретых частиц металла (стальных шариков) с возможностью контролируемого изменения этих параметров.

На рис. 1 приведена функциональная схема разработанного устройства: где рамка, с зажатым в ней образцом, связана с механизмом ее передвижения, согласно программе изменения координат.

Установка состоит из бункера-накопителя 1, со стальными шариками 2, диска сепаратора 3, который приводится в движение мотором 5, желоба для подачи шарика в зону нагрева индуктора-нагревателя 4, с тормозным электромагнитом, толкателя с приводом от электромагнитного линейного двигателя 7. Система управления и контроля за процессом нагрева состоит из радиационного пирометра, выход которого связан регистратором температуры с датчиком температуры, выход которого связан с входом блока управления 11. Один из выходов блока управления связан с регулятором силы тока 6 индуктора 4, а другой выход с регулятором силы тока 8 в электромагнитном линейном двигателе 7. Со стороны входного отверстия электромагнитного линейного двигателя расположены датчики измерения скорости 9, выход которых подключен к регистратору скорости, а выход его подключен к блоку управления 11, с блоком питания 10. Механизм перемещения образца относительно линейного двигателя и нагревателя имеет двигатели 13 и 14, размещенные на платформе 15.

Подвижная рамка 16 с образцом 12 крепится стальными тросиками 17, имеющими возможность движения по блочкам 18. Платформа 15 имеет возможность поворота относительно траектории движения раскаленного шарика при помощи планки 20 на оси вращения 19.

Устройство работает следующим образом. При повороте диска сепаратора 3 из бункера-накопителя 1 подается стальной шарик 2 по желобу в зону нагрева индуктора-нагревателя 4, выполненного в виде двух половин. Для фиксации в индукторе стального шарика по сигналу из блока управления 11 включается тормозной электромагнит, взаимодействующий с не нагретым стальным шариком, фиксируя его в центре индуктора. После фиксации шарика, по сигналу блока управления 11, через регулятор нагрева 6 подается ток в индуктор и отключается тормозной электромагнит, а фиксация шарика в центре индуктора осуществляется электромагнитным полем индуктора.

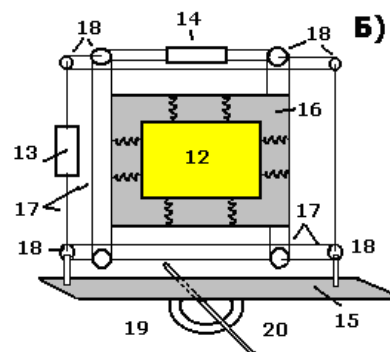


Рис. 1 Установка по исследованию теплозащитных материалов на искростойкость а) блок по нагреву и метанию шариков, б) блок по перемещению ленты с образцом / Setting on research of heatcover materials on firmness to the sparks a) block on heating and throwing of marbles, b) block on moving of ribbon with a standard : 1 - бункер-накопитель; 2 - стальные шарики; 3 - сепаратор; 4 - мотор; 5 - индуктор-нагреватель; 6 - регулятор силы тока; 7 - толкатель; 8 - регулятор скорости движения; 9 - индукционные датчики скорости; 10 - блок питания; 11 - блок управления; 12 - исследуемый образец; 13, 14 - электромагнитные линейные двигатели; 15 - платформа; 16 - подвижная рамка; 17 - стальные тросики; 18 - блочки; 19 - ось вращения; 20 - планка.

При достижении заданной температуры нагрева, определяемой посредством радиационного пирометра с регистратором температуры и датчиком температуры. С выхода датчика сигнал подается на блок управления 11. С выхода блока управления 11 подается сигнал на привод толкателя, толкатель перемещает нагретый шарик в зону действия линейного электромагнитного двигателя 7, по сигналу с блока управления через регулятор скорости движения 8 раскаленный шарик приводится в движение, пролетая через индукционные датчики скорости 9.

Сигнал с индукционных датчиков скорости 9 регистрируется устройством, и выходной сигнал с регистратора подается на блок управления 11. Раскаленный шарик, пролетая дальше по траектории, встречается с исследуемым образцом 12. После выстрела диск сепаратора, вращаясь, подает новый шарик и цикл повторяется. В течение времени нагрева шарика, по сигналу с блока управления, с помощью электродвигателя 13, 14 подвижная рамка 16 перемещается на заданный шаг.

Обработав последовательно всю поверхность исследуемого образца, проводят количественную оценку устойчивости материала к частицам раскаленного металла

по глубине прогорания или проплавления места контакта, диаметра выгоревшего пятна, изменения структуры материала или его состава в месте контакта, изменения механических и физических свойств материала после бомбардировки раскаленными частицами.

Для определения области существования критериев исследования предлагаемым методом необходимо решить задачу со следующими допущениями [1]:

- капля металла взята в виде идеального шара;
- размер капли (радиус) взят как среднестатистический;
- капля подвешена на не теплопроводящей тонкой нити в воздухе;
- движение воздуха исключено;
- теплопередача за счет теплопроводности исключена из расчета;
- в расчете не учтен процесс окисления поверхности раскаленной капли и образование окалины (окисной пленки);

- не учтено время кристаллизации металла;
- значения коэффициентов ϵ и α приближенные.

Процесс воздействия раскаленного металлического шарика на исследуемый материал условно разделен на три этапа [1, 4]:

- нагрев шарика до заданной температуры и ее контроль;
- полет шарика в воздушной среде с последующим охлаждением;
- удар шарика об исследуемую поверхность с передачей кинетической и тепловой энергии.

Кроме того, необходимо контролировать силу и задавать направление удара частицы относительно испытуемого материала.

Расчет процессов теплопередачи является сложной математической задачей, включающей решение многих систем нелинейных уравнений [12].

С использованием определенных допущений, принимаем два механизма теплопереноса – молекулярный и конвективный. Молекулярный механизм - осуществляется посредством теплового движения микрочастиц в среде (теле) с неоднородным распределением температуры, т. е., если в исследуемой среде (например, в раскаленном теле) нет градиента температуры по объему среды (тела), такой механизм теплопередачи в данном случае не имеет места. Конвективный механизм - осуществляется в среде с неоднородным распределением скорости и температуры микроскопическими элементами среды при их перемещении. Различают три способа переноса тепла: теплопроводность, конвекция и излучение. Теплопроводность - это молекулярный перенос тепла в сплошной среде, обусловленный наличием градиента температур.

Теплоперенос по этому "способу" может быть в общем случае рассчитан по формуле [11-13]:

$$Q = \lambda_m \cdot \frac{T_\theta - T_X}{\delta} \cdot S \cdot \tau, \quad (1)$$

где:

Q - количество тепла, передаваемое через

поверхность, Вт;

T_θ, T_X - температура горячей и холодной поверхностей, К;

S - площадь поверхности, м²;

τ - время, ч;

δ - толщина поверхности, м;

λ_m - коэффициент теплопроводности, Вт/м*К.

Если рассматривать каплю металла в виде идеального шарика небольшого размера и учитывая, что коэффициент теплопроводности металла высок, можно считать, что во всем объеме капли металла температура одна и та же и равна температуре поверхности. А поскольку перенос тепла "способом теплопроводности" возможен лишь по молекулярному механизму, обязательным условием которого является наличие неоднородного теплового поля в среде (теле), т. е. наличия градиента температур, то можно сказать, что для решения данной частной задачи этот вид теплопередачи из общего баланса может быть исключен. Решение задачи в случае совместного теплообмена "способами" конвекции и излучения можно представить в следующих двух вариантах решения – приблизительном и точном. Приблизительный вариант необходим для определения пределов области существования данного решения. Для решения вводится понятие коэффициента теплоотдачи " α ", который равен плотности теплового потока на поверхности раздела, отнесенный к разности температур между средой и поверхностью. Задаемся условиями для определения математической модели охлаждения расплавленной капли металла в воздухе. Форма капли - идеальный шар, радиус капли - R, вес капли - G, теплоемкость капли - C, материал капли - медь, алюминий, сталь с плотностью металла - ρ .

Рассмотрим приближенное решение:

За счет излучения капля (шар) теряет энергию dQ за время dt:

$$dQ_u = 4\pi R^2 \epsilon \sigma_0 T_H^4 dT, \quad (2)$$

где:

ϵ - степень черноты (коэффициент излучения) поверхности капли ($\epsilon \approx 1$);

σ - постоянная Стефана-Больцмана

($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ (Вт/м²·°К⁴)).

Потери конвективного теплообмена составят:

$$dQ_k = 4\pi R^2 \alpha (T_H - T_B) dT. \quad (3)$$

α - [Вт/м²·°К⁴] коэффициент теплоотдачи между поверхностью капли с температурой нагрева T_H и воздухом, который имеет в общем случае температуру T_B , тогда суммарная потеря энергии равна:

$$dQ = dQ_u + dQ_k = [4\pi R^2 \epsilon \sigma_0 T_H^4 dT + 4\pi R^2 \alpha (T_H - T_B) dT]. \quad (4)$$

Потеря энергии влечет изменение температуры капли по известному закону [2]:

$$dQ = cG\alpha T_H \quad (5)$$

Сравнивая (4) и (5), получим

$$\alpha T_H = \frac{4\pi R^2 \varepsilon \sigma_0}{cG} \left(T_H^4 + \frac{\alpha}{\varepsilon \sigma_0} T_H - \frac{\alpha}{\varepsilon \sigma_0} T_B \right) dT. \quad (6)$$

После преобразования равенство будет иметь вид:

$$\frac{\bar{c} G}{4\pi R^2 \alpha T_\infty} \cdot \left(\frac{1}{\frac{\varepsilon \sigma_0}{\alpha T_\infty} \cdot T_H^4 + \frac{1}{T_B \cdot T - 1}} \right) \cdot dT_H = dt. \quad (7)$$

Проинтегрируем это выражение от T_H - начальной температуры в момент времени $t=0$ и до T_K - конечной температуры, достигаемой за время t_K .

Введем допущение и пренебрегаем единицей в знаменателе, тогда, используя табличный интеграл, получим:

$$\int \frac{dx}{x(a + bk^m)} = \frac{1}{a \cdot m} \cdot \ln \left| \frac{x^m}{a + bk^m} \right|. \quad (8)$$

После преобразований получаем в окончательном виде уравнение (9):

$$\frac{\bar{c} R \rho}{9\alpha} \cdot \ln \left| \frac{\frac{1}{T_K^3} + \frac{\varepsilon \sigma_0}{\alpha}}{\frac{1}{T_H^3} + \frac{\varepsilon \cdot \sigma_0}{\alpha}} \right| = \Delta t. \quad (9)$$

Необходимо учитывать [10], что при остывании жидкой капли до достижения температуры кристаллизации за время $\Delta t_{кр}$ температура ее остается постоянной. Это время найдем из условия:

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho \cdot \Delta H = \left[4\pi R^2 \varepsilon \sigma_0 T^4 + 4\pi R^2 \alpha \cdot (T_{кр} - T_e) \right] \cdot \Delta t_{кр}. \quad (10)$$

т.е.

$$\Delta t_{кр} = \frac{R \cdot \rho \cdot \Delta H}{3[\sigma_0 \varepsilon T_{кр}^4 + \alpha(T_{кр} - T_\infty)]} \text{ сек.}$$

где:

$T_{кр}$ - температура плавления(кристаллизации), К;
 ΔH - теплота плавления металла, Дж/кг.

Таким образом, при определении времени остывания капли от T_H до T_K , но не ниже, чем температура кристаллизации следует использовать выражение (9) и все данные брать для жидкого металла. Для температуры ниже температуры кристаллизации можно сделать допущение, что время кристаллизации мало, и его можно не учитывать в суммарном времени остывания.

Теперь рассмотрим уточненное решение: где уравнение (2) примет вид:

$$dQ_k = 4\pi R^2 \varepsilon \sigma_0 (T_H - T_B)^4 dT. \quad (11)$$

Уравнение (3) остается в прежнем виде, уравнение (4) примет вид:

$$dQ = [4\pi R^2 \varepsilon \sigma_0 (T_H - T_\infty) + 4\pi R^2 \alpha (T_H - T_\infty)] dT. \quad (12)$$

Уравнение (5) не меняется, а уравнение (6) примет вид:

$$\alpha T_H = \frac{4\pi R^2 \varepsilon \sigma_0}{cG} \left[(T_H^4 - T_\infty) + \frac{\alpha}{\varepsilon \sigma_0} (T_H - T_\infty) \right] dT. \quad (13)$$

После преобразования уравнения (13) получим:

$$\frac{\bar{c} G}{4\pi R^2 \varepsilon \sigma_0} x \left(\frac{1}{(T - T_\infty)^4 + (T - T_\infty) \cdot \frac{\alpha}{\varepsilon \sigma_0}} \right) \cdot dT = dt. \quad (14)$$

Проинтегрируем уравнение (14) учтя, что $T_* = T - T_B$, $T_{*H} = T_H - T_B$, $T_{*K} = T_K - T_B$ и получим в окончательной форме:

$$\Delta t = \frac{\bar{c} R \rho}{9\alpha} \cdot \ln \frac{\frac{1}{(T_b - T_e)^3} + \frac{\varepsilon \sigma_0}{\alpha}}{\frac{1}{(T - T_e)^3} + \frac{\varepsilon \sigma_0}{\alpha}}. \quad (15)$$

В результате решим задачу на определение времени (Δt) теплообмена при следующих начальных условиях: материал капли – медь, $T_K = 1000$ К, радиус капли – $3 \cdot 10^{-3}$ м, плотность меди $\rho = 8,92 \cdot 10^3$ кг/м³, теплоемкость меди – $c = 385,5$ Дж/(кг*К), $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м² · К⁴, $\varepsilon = 0,5$, $\alpha = 17$ Вт/м² · К⁴. Тогда приближенное значение в секундах равно:

$$\Delta t = \frac{385,5 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 8,92 \cdot 10^3}{9 \cdot 17} x \ln \frac{\frac{1}{T_b^3} + \frac{0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}}{17}}{\frac{1}{1000^3} + \frac{0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}}{17}} = 67,42 \cdot \ln \frac{\frac{1}{T_b^3} + 1,67 \cdot 10^{-4}}{2,67 \cdot 10^{-9}}. \quad (16)$$

Результаты вычислений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты цифрового решения / Results of digital decision

T_{ki} К	Δt пригл. расчет, с	T_{ki} К	Δt пригл. расчет, с
1000	0	600	57,9
900	8,8	500	86,8
800	20,6	400	126
700	36,5	300	180

Научная новизна и практическая значимость

Впервые предложен новый метод, позволяющий дополнить существующие и получить более достоверные результаты. Все вышесказанное и определило направление работы по созданию методики исследования этих параметров и создание установки, которая обеспечивала бы постоянство таких параметров, как масса, скорость полета, температура и траектория полета нагретых частиц металла (стальных шариков) с возможностью контролируемого изменения этих параметров. С учетом недостатков существующих методов предложен более совершенный метод и проект

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Адрианов В. Н. Основы радиационного и сложного теплообмена / В. Н. Адрианов. – М.: Энергия, 1992. – 464 с.
Adrianov V. N. Osnovy radiatsionnogo i slozhnogo teploobmena / V. N. Adrianov. – М.: Ehnergiya, 1992. – 464 s.
2. Аметистов Е. В. Основы теории теплообмена / Е. В. Аметистов. М.: МЭИ, 2011. – 242 с.
Ametistov E. V. Osnovy teorii teploobmena / E. V. Ametistov. М.: МЭИ, 2011. – 242 s.
3. Герашенко О. А. Основы теплотехники / О. А. Герашенко. – К.: Наукова думка, 1991. – 192 с.
Gerashhenko O. A. Osnovy teplometrii / O. A. Gerashhenko. – К.: Naukova dumka, 1991. – 192 s.
4. Гордов А. Н. Основы температурных измерений / А. Н. Гордов О. М. Жагулло, А. Г. Иванова. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 304 с.
Gordov A. N. Osnovy temperaturnykh izmerenij / A. N. Gordov O. M. Zhagullo, A. G. Ivanova. – М.: Energoatomizdat, 1992. – 304 s.
5. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением / Р. Зигель Дж. Хауэлл. – М.: Мир, 2005. – 934 с.
Zigel' R., Khauehll Dzh. Teploobmen izlucheniem / R. Zigel' Dzh. Khauehll. – М.: Mir, 2005. – 934 s.
6. Криксунов Л. З. Основы инфракрасной техники / Л. З. Криксунов. – М.: Сов. радио, 1988. – 400 с.
Kriksunov L. Z. Osnovy infrakrasnoj tekhniki / L. Z. Kriksunov. – М.: Sov. radio, 1988. – 400 s.
7. Линеveg Ф. Измерение температур в технике / Ф. Линеveg; [пер. с немец. Т. И. Киселева, В. А. Федорович

установки для испытания теплозащитных материалов. Создана конструктивная разработка – устройство, позволяющее контролировать размеры капли, кинетическую энергию удара, направление полета и температуру раскаленной частицы.

Выводы

Приведенное выше решение с известными допущениями позволило определиться в масштабе времени остывания частицы раскаленного металла, дать техническое задание на разработку установки, позволяющей обрабатывать образцы теплозащитных материалов, частицами раскаленного металла, задавая их размерами, температурой нагрева и скоростью удара об образец. Принимая скорость полета частицы металла 1 м/сек, а расстояние от точки нагрева и точки выброса до образца в пределах 150-200 мм, допуская снижение температуры за счет конвективной теплоотдачи в пределах $\pm 8\%$, что вписывается в допустимую погрешность $\pm 10\%$.

под ред. Л. А. Чарихова]: справочник: М.: Металлургия, 1989. – 543 с.

Lineveg F. Izmerenie temperatur v tekhnike / F. Lineveg; [per. s nemets. T. I. Kiseleva, V. A. Fedorovich pod red. L. A. Charikhova]: spravochnik: М.: Metallurgiya, 1989. – 543 s.

8. Стрежекуров Э. Е. Особенности исследования терморadiационной напряженности в горячих цехах промышленности / Э. Е. Стрежекуров // Системные технологии. – №4. – 2009. – С. 15–18.

Strezhekurov Eh. E. Osobennosti issledovaniya termoradiatsionnoj napryazhennosti v goryachikh tsekhakh promyshlennosti / Eh. E. Strezhekurov // Sistemnye tekhnologii. – №4. – 2009. – S. 15–18.

9. Термоприборы, датчики для измерения температуры в промышленности. К.: Наукова думка, 1972. – 224 с.

Termopribory, datchiki dlya izmereniya temperatury v promyshlennosti. К.: Naukova dumka, 1972. – 224 s.

10. Hespel L., Mainguy S., Grajjet J-J. Radiative properties of scattering and absorbing dense media: theory and experimental study. // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2013. – Vol. 77. – P. 193–210.

11. Makino T. Thermal radiation properties of ceramic materials / T. Makino, T. Kunitomo, I. Sakai // Heat Transfer Japan. Res. 2014. – Vol. 13. – No. 74. – P. 33–50.

12. Nicolau V.P. Spectral radiative properties identification of fiber insulating materials / V.P. Nicolau, M. Raynaud, J.-F. Sacadura // Int. J. Heat Mass. Transfer. 2014. – Vol. 37. – Suppl. 1. – P. 311–324.

13. Wentink T. Infrared emission spectra / T. Wentink, W.G. Planet // J. Opt. Soc. Amer. – 2011. – Vol. 51. – No. 36. – P. 595–603.

Статья рекомендована к публикации д-ром. техн. наук, проф. Н. В. Шпирько (Украина); д-ром. техн. наук, проф. С. З. Полищуком (Украина)

Статья поступила в редколлегия 07.08.2015