

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА ТОВАРОЗНАВСТВА

УДК 620: 614.8

Кралуєк М. О.,

m-kraluk@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0693-9508,

Researcher ID: AAG-3258-2021,

завідувачка відділу електротехнічних, пожежно-технічних та досліджень питань безпеки життєдіяльності,

Одеський науково-дослідний інститут судових експертиз Міністерства юстиції України, м. Одеса

Омельченко Н. В.,

natomen@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3718-8484,

Researcher ID: F-1665-2017,

к.т.н., проф., професор кафедри товарознавства, торговельного підприємництва та експертизи товарів,

Луганський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Старобільськ, Луганська область голова, головний експерт,

Науково-дослідний центр «Незалежна експертиза», м. Полтава

Пащинська О. Г.,

elena.pachinska@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7102-1544,

Researcher ID: AAE-5739-2021,

д.ф.-м.н., провідний науковий співробітник,

Донецький фізико-технічний інститут імені О.О. Галкіна Національної академії наук України, м. Київ

Браїлко А. С.,

anna.brailko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3616-3149,

Researcher ID: Q-4127-2016,

к.т.н., доцент кафедри товарознавства, торговельного підприємництва та експертизи товарів,

Луганський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Старобільськ, Луганська область, перший заступник голови, головний експерт,

Науково-дослідний центр «Незалежна експертиза», м. Полтава

ФОРМУВАННЯ СПОЖИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ САМОРЯТІВНИКІВ ШАХТНИХ ІЗОЛЮЮЧИХ НА ХІМІЧНО ЗВ'ЯЗАНОМУ КИСНІ

Анотація. Однією з найбільш травматичних галузей в Україні залишається вугільна. В аварійній ситуації органи дихання працівників та рятувальників потребують захисту від дії отруйних речовин та пилу, для чого використовуються саморятівники шахтні ізолюючі на хімічно зв'язаному кисні. Зазначені апарати мають низку недоліків, одним із яких є нагрівання елементів саморятівника та вдихуваної газодинамічної суміші під час експлуатації. Для зниження температурних показників науковцями пропонується використання в саморятівниках тепловогообмінника з насадкою з декількох шарів металевих сіточок або тампона плутаних металевих тонких ниток («мочалка»), а також розгалужених перфорованих теплогазорозподільників, що зазвичай виготовляються з алюмінію – матеріалу з високим коефіцієнтом теплопровідності. Метою роботи є отримання прутків з міді марки МІ з унікальним комплексом фізико-механічних властивостей для вдосконалення конструкції саморятівників шахтних ізолюючих на хімічно зв'язаному кисні. Комбінованою деформацією прутків з міді марки МІ отримано високі значення показників механічних властивостей зі збереженням теплопровідності, як у вихідному (недеформованому) стані. Запропоновано спосіб комбінованої пластичної деформації розтягуванням з одночасним крутінням зі зміною напрямку обертання на протилежний. За результатами

випробувань вибрана найрезультативніша схема деформаційної обробки мідних прутків. Деформовані за вибраною схемою прутки з міді марки М1 запропоновано використовувати під час виготовлення теплогазорозподільників і тепловогообмінників для вдосконалення конструкції саморятівників шахтних ізолюючих на хімічно зв'язаному кисні. Подальші дослідження в означеному напрямі планується спрямовувати на розроблення конструкції теплогазорозподільників і тепловогообмінників саморятівників з використанням деформованих за визначеною схемою прутків з міді марки М1 та випробування удосконалених апаратів в умовах акредитованих лабораторій.

Ключові слова: саморятівник ізолюючий, безпека, регенеративний продукт, мідь, комбінована пластична деформація, теплопровідність, теплогазорозподільник, тепловогообмінник.

Kraliuk M. O.,

m-kraluk@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0693-9508,

Researcher ID: AAG-3258-2021,

Head of the Department of Electrical, Fire-technical and Life Safety Research,

Odesa Research Institute of Forensic Science of the Ministry of Justice of Ukraine, Odesa

Omelchenko N. V.,

natomen@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3718-8484,

Researcher ID: F-1665-2017,

Ph.D., Professor, Professor at the Department of Commodity Research, Commercial Business and Products Expertise,

Luhansk Taras Shevchenko National University, Starobilsk, Luhansk region,

Chief, Chief Expert,

Scientific Research Center “Nezalezhna ekspertyza”, Poltava

Pashynska O. H.,

elena.pachynska@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7102-1544,

Researcher ID: AAE-5739-2021,

Doctor Sc. degree in Solid State Physics, Leading Researcher,

Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O. Galkin of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Brailko A. S.,

anna.brailko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3616-3149,

Researcher ID: Q-4127-2016,

Ph.D., Associate Professor at the Department of Commodity Research, Commercial Business and Products Expertise,

Luhansk Taras Shevchenko National University, Starobilsk, Luhansk region,

First Deputy Chief, Chief Expert,

Scientific Research Center “Nezalezhna ekspertyza”, Poltava

FORMATION OF APPLICATION CHARACTERISTICS OF CHEMICAL OXYGEN SELF-CONTAINED SELF-RESCUERS

Abstract. *The coal industry remains one of the most traumatic in Ukraine. In an emergency, the respiratory system of workers and rescue team needs protection from the effects of toxic substances and dust, and thus, chemical oxygen self-contained self-rescuers are used. The mentioned devices have some downsides, one of which is the heating of the elements a self-contained self-rescuer (SCSR) and inhaled gas-dynamic mixture during operational use. To reduce temperature indicators, the scientists propose SCSRs involve a heat and moisture exchanger with a nozzle made of several layers of metal meshes or a tampon of tangled metal thin threads (“washcloth”) and branched perforated heat and gas spreaders, usually made of aluminum – a material that has high thermal conductivity. The purpose of the research is to produce M1 copper rods with a unique complex of physical and mathematical characteristics for improving the construction of chemical oxygen SCSRs. A combined deformation of M1 copper rods has resulted in a strong performance of mechanical characteristics with the preservation of thermal conductivity as in the initial (undeformed)*

state. The way of a combined plastic tensile deformation, including simultaneous rotation with a change of rotation direction to the opposite, is put forward. Based on test operations, the authors have chosen the most efficient scheme of deformation processing of copper rods. Being deformed under the scheme, M1 copper rods are proposed to be used when producing heat and gas spreaders and heat and moisture exchangers for improving the construction of chemical oxygen SCSRs. The authors are looking to focus further research in the relevant realm on elaborating the construction of heat and gas spreaders and heat and moisture exchangers of SCSRs using M1 copper rods deformed following the above scheme and to test the improved apparatuses in accredited laboratories.

Key words: self-contained self-rescuer, safety, regenerative process, copper, combined plastic deformation, thermal conductivity, heat and gas spreader, heat and moisture exchanger.

JEL Classification: C42; C91; J28; L67; O31.

DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2021-26-01>

Постановка проблеми. Вугільна галузь перебуває на одному з останніх місць за абсолютними та відносними показниками зниження травматизму, основними причинами якого є аварії. Найнебезпечнішими факторами аварій є токсична дія шкідливих газів, частинок диму й нестача кисню, оскільки вони можуть призвести до смертельного травмування працівників. Вже на ранній стадії аварій токсичні продукти можуть викликати задуху і втрату свідомості, роблячи людину безпорадною. В умовах пожеж під час горіння сучасних синтетичних матеріалів утворюється більше 200 найменувань токсичних газоподібних продуктів (оксид та двооксид вуглецю, бензол, синильна кислота, фосген, хлористий водень, акролеїн, хлор, оксиди азоту тощо) в концентраціях, що перевищують гранично допустимі норми в тисячі й більше разів, тому в аварійній ситуації органи дихання працівників та рятівників потребують захисту. Для евакуації працюючих з аварійної дільниці на свіжий струмінь повітря використовуються саморятівники шахтні (фільтруючі або ізолюючі). Саморятівники фільтруючі конструктивно простіші та менш коштовні, проте вони не забезпечують захист від багатьох шкідливих речовин і не потрібні у випадках низького (нижче 17%) вмісту кисню в рудниковій атмосфері вугільних, рудних та нерудних шахт. Необхідний для дихання в ізолюючих апаратах кисень знаходиться в балоні в скрапленому стані або зв'язаний хімічно. Густина хімічно зв'язаного кисню (і потенційний захисний ресурс) у декілька разів більше, ніж у стиснутого. В апаратах на скрапленому кисні цей показник ще вищий. Однак останні не отримали широкого застосування, тому що не зберігаються в спорядженому стані і не можуть з цієї причини використовуватися оперативно [1].

Найбільш ефективними для досягнення цих цілей є саморятівники шахтні ізолюючі на хімічно зв'язаному кисні. Під час протікання регенеративного процесу в саморятівнику шахтному ізолюючому на хімічно зв'язаному кисні відбуваються хімічні реакції, пов'язані з поглинанням з повітря, що видихується людиною, водяної пари та двооксиду вуглецю, виділенням кисню й теплоти. Зниження температури вдихуваної газодинамічної суміші (далі – ГДС) працюючими та збільшення коефіцієнта відпрацювання регенеративного продукту є головними завданнями, що постають перед розробниками та виробниками саморятівників шахтних ізолюючих на хімічно зв'язаному кисні. Означене обумовлює необхідність проведення досліджень у цьому напрямі [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний внесок у розроблення та вдосконалення засобів захисту органів дихання, а саме саморятівників ізолюючих на хімічно зв'язаному кисні, здійснили Н.М. Бурего, М.С. Діденко, С.Г. Єхилевський, Л.О. Зборщик, Е.Г. Ільїнський, Є.І. Конопелько, В.К. Овчаров, С.О. Ольшанников, В.В. Пак, Т.П. Фоменко, V. Adjiski, Z. Despodov, S. Mijalkovski, J.J. Pelders, J.H. de Ridder, D. Serafimovski та інші науковці [1; 3–10].

Під час протікання регенеративного процесу в саморятівнику шахтному ізолюючому на хімічно зв'язаному кисні відбуваються хімічні реакції, пов'язані з поглинанням з повітря, що видихається людиною, водяної пари і двооксиду вуглецю, виділенням кисню й теплоти, тому тепловологообмінники як пристрої для зниження температури вдихуваного з апарату повітря є важливими складовими частинами сучасних саморятівників шахтних ізолюючих на хімічно зв'язаному кисні. Проблема зниження температури вдихуваної ГДС є комплексною

і пов'язана з тепловим балансом системи «саморятівник – людина», а її подолання є одним із ключових завдань для розробників саморятівників. Якщо за мінусових температур повітря умови дихання в саморятівниках шахтних ізолюючих на хімічно зв'язаному кисні сприятливо позначаються на користувачах, то нагрівання дихальної суміші за плюсових температур експлуатації є однією з основних причин дискомфорту людини. Особливостями саморятівників шахтних на хімічно зв'язаному кисні є значне нагрівання та осушення регенерованого повітря, в результаті чого, якщо не вжити спеціальних заходів щодо його кондиціонування, на вдих надійде дуже гаряче та сухе повітря.

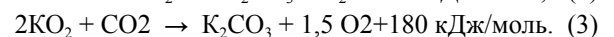
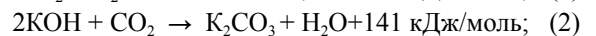
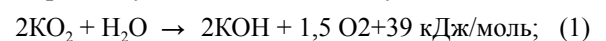
Оптимізація вологості вдихуваного повітря досягається шляхом часткового теплового обміну між регенерованим в апараті сухим повітрям і повітрям, що видихається, насиченим водяними парами. Цей процес здійснюється у «мертвому» просторі повітряної системи саморятівника, в яке входять лицьова частина (загубник) і обсяг в місці з'єднання дихальних шлангів, лицьової частини (загубника) і теплового обмінника. Сутність теплового обміну за маятникової схеми руху повітря полягає в змішуванні частини повітря, яка видихається з повітрям, що надходить з апарату на вдих. В результаті змішування знижується температура вдихуваного повітря і підвищується його волога. З іншого боку, одночасно знижується вміст вологи повітря, що надходить в регенеративний патрон, що сприятливо позначається на його дії. Для зниження температури вдихуваної ГДС виділяють такі можливі шляхи, як використання в схемі холодильника (тепло- або вологообмінника); зниження кількості тепла, що виділяється регенеративним продуктом; розсіювання тепла в навколишню атмосферу елементами апарату [11].

Температура дихальної газової суміші, що виходить з регенеративного патрона в сполучну трубку, досягає 120–140°C [11]. За маятникової схеми дихання гофротрубка сама слугує теплообмінником, забирає з повітря, що проходить, велику кількість тепла. Для поліпшення тепловологових характеристик повітря, що надходить для дихання, можуть бути використані тепловологообмінники, які містять насадку з матеріалів, що мають високу теплопровідність та гігроскопічність. Наприклад, відомий апарат з маятникової схемою дихання з теплообмінником у вигляді коробки з металевим дротом або пакета з металевих сіток, які розташовуються між лицьовою

частиною і патроном. Апарат може мати різні варіанти конструктивного виконання залежно від місця розташування теплового обмінника: у верхнього краю дихального шланга, у верхній частині патрона, в середині шланга. Найефективнішим, нетрудомістким під час виготовлення й безпечним для дихання є тепловологообмінник з насадкою з декількох шарів металевих сіточок або тампона плутаних металевих тонких ниток («мочалка») [11]. Під час використання теплообмінників, установлених на виході з патрона (наприклад, з листового алюмінію), температура на вдиху знижується на 3–5°C. Для зниження температури вдихуваної ГДС в низці апаратів застосовується тепловологообмінник у вигляді спіралі з листового алюмінію, розташований у місці з'єднання гофротрубки з лицьовою частиною. Акумуляція тепла під час вдиху та віддача його під час видиху назад у регенеративний патрон з подальшим винесенням в навколишнє середовище вимагає використання металу з великою теплопровідністю і теплоємністю. Застосування такого теплообмінника дає змогу знизити температуру вдихуваної ГДС на 5–10°C [11].

Р.С. Плетенецьким доведено, що у саморятівників типу СГЕ фізичні процеси, пов'язані з масо- і теплообміном, плавленням і спіканням продуктів реакції, максимально оптимізовані конструктивно завдяки застосуванню розгалужених перфорованих теплогазорозподільників з алюмінію з достатньою теплопровідністю та кондиціонуванням повітря, що видихається, а також варіюванням товщини шару продукту.

Протікання регенеративного процесу в ізолюючому дихальному апараті (далі – ІДА), спорядженому кисневмісною речовиною на основі надпероксиду калію KO_2 , має таку залежність [5]:



Таким чином, у відпрацьованому продукті накопичуються гідроксид калію (KOH) та карбонат калію (K_2CO_3). У присутності невідпрацьованого KO_2 ці компоненти утворюють евтектичні суміші KOH – K_2CO_3 – KO_2 , тобто композиції, що плавляться за більш низьких температур, ніж вихідні компоненти (температура плавлення KOH, K_2CO_3 і KO_2 становить 404, 891 та 535°C відповідно). Через те, що найбільш легкоплавким із перерахованих речовин є KOH, від його накопичення в продукті будуть залежати ефективність поглинання CO_2 та інтенсивність процесу спікання [12; 13].

Якщо в газовій суміші, що надходить до регенеративного патрона, буде значна кількість вологи, то це буде сприяти накопиченню КОН і швидкому утворенню легкоплавких евтектик. Навпаки, за зменшення частки вологи у вдихуваній газовій суміші створення евтектик буде уповільнено у зв'язку з повільним накопиченням КОН, що сприятиме збільшенню тривалості активного періоду роботи дихального апарату. Оскільки процес регенерації є екзотермічним, тобто таким, що супроводжується великим тепловиділенням і значним осушенням газової дихальної суміші, то це призводить до підвищення температури вдихуваного з апарату повітря до 60°C, зниження його відносної вологості до 20%, підвищення опору диханню й значному нагріванню конструктивних елементів саморятівника, зрештою, до дискомфорту застосування ІДА. Здійснюючи кондиціонування вдихуваної людиною суміші шляхом зміни її вологості, можемо оптимізувати процеси регенерації в патроні щодо більш економного витрачання продуктом запасу кисню, забезпечення ефективного поглинання CO₂ і поліпшення температурно-вологісних параметрів вдихуваного повітря [14].

Кондиціонування вдихуваного повітря можна забезпечити за допомогою тепловологообмінника, який повинен бути виготовлений зі стійких у сухому середовищі матеріалів, мати відносно високу вологоємність, бути ефективним до теплообміну за багаторазово повторюваних циклів «вдих-видих». Зниженням вологості повітря зменшується кількість виділеної теплоти [10]. Під час навантаження середньої тяжкості легенева вентиляція дорівнює 35 дм³/хв., частота дихання – 20 хв⁻¹, обсяг одного видиху – 1,75 дм³, кількість водяної пари в повітрі, що видихається, – близько 0,088 г. В динаміці дихання ця кількість водяної пари може змінюватися. Під час видиху на поверхні металевих сіток тепловологообмінника конденсується частина вологи з повітря, а під час вдиху сухе й більш нагріте повітря з регенеративного патрона віддає частину свого тепла на випаровування цієї вологи, у зв'язку з чим повітря зволожується і при цьому охолоджується. Таким чином, створюються більш комфортні умови дихання в саморятівниках [10; 11].

Нині надпероксидні регенеративні продукти для ІДА виробляються у формі гранул, блоків, таблеток тощо та мають високу реакційну здатність до CO₂ і парів води повітря, що видихається. Однак їх використання для регенерації повітря в системах життєзабезпечення пов'язане з вирі-

шенням низки таких проблем [1; 11; 15]:

під час реакції з парами води і CO₂ надпероксиди лужних металів мають тенденцію до утворення розплаву на поверхні гранул, що ускладнює дифузію газу до поверхні речовини, що не прореагувала, призводить до зниження ефективності використання регенеративних продуктів і збільшення масогабаритних характеристик ІДА; плавлення гранул регенеративного продукту сприяє спіканню шихти й зростанню опору диханню в ІДА;

в шарі гранульованого регенеративного продукту під час роботи ІДА підвищується температура, за якої неметалеві матеріали, що традиційно застосовуються для виготовлення деталей і вузлів саморятівників, під час контакту з гарячим корпусом регенеративного патрона і ГДС виділяють шкідливі для здоров'я користувача речовини, що погіршує експлуатаційні характеристики ІДА.

Через складні умови експлуатації в гірничих виробках саморятівники піддаються ударним навантаженням, що необхідно враховувати під час їх виготовлення.

Таким чином, для забезпечення зниження температури ГДС, що вдихається працівниками, та збільшення коефіцієнта відпрацювання регенеративного продукту доцільним є вдосконалення конструкції саморятівників шахтних ізолюючих на хімічно зв'язаному кисні за рахунок виготовлення теплогазорозподільників і тепловологообмінників з використанням матеріалів з високими показниками теплопровідності та міцності.

Постановка завдання. Метою роботи є отримання прутків з міді марки М1 з унікальним комплексом фізико-механічних властивостей для вдосконалення конструкції саморятівників шахтних ізолюючих на хімічно зв'язаному кисні.

Об'єктами дослідження вибрані зразки міді марки М1 (прутки Ø 2,23 мм та робочою довжиною l₀ 220 мм) та саморятівник шахтний ізолюючий на хімічно зв'язаному кисні. Предметом дослідження є комплекс фізико-механічних властивостей комбіновано деформованих прутків з міді марки М1 та вдосконалення конструкції саморятівників шахтних ізолюючих на хімічно зв'язаному кисні.

Виклад основного матеріалу дослідження. В саморятівниках шахтних ізолюючих на хімічно зв'язаному кисні в теплогазорозподільниках та тепловологообмінниках замість алюмінію можливе використання металу з більш високою теплопровідністю, а саме міді марки М1. За рахунок високих показників тепло- та елек-

тропровідності мідь широко застосовується для виробництва різноманітних провідників, а висока корозійна стійкість, здатність до прокатки, гарна зварюваність, висока технологічність розширюють галузі її використання. Проте в процесі виробництва (від сировини до готового виробу), за якого переважно застосовують волочіння, мідь втрачає такі цінні властивості, як високу електропровідність та пластичність. Ця втрата відбувається в результаті нагартування, за якого відбувається накопичення дефектів в об'ємі матеріалу.

Застосування комбінованої пластичної деформації дає можливість розроблення нових ефективних технологій обробки матеріалів, за допомогою яких можна очікувати підвищення комплексу механічних і фізичних властивостей внаслідок найінтенсивнішого подрібнення структури, тому багато років вчені всього світу займаються проблемами деформування різних матеріалів [16; 17].

Обробленню піддавали зразки міді марки М1. За схему комбінованої деформації було вибрано кругіння з одночасним розтягуванням на установці К-5. Швидкість обертання під час крутіння складала 30 об./хв. Після досягнення визначеної кількості обертів (N_1) напрямком обертання змінювали на протилежний з кількістю обертів (N_2). Навантаження, що розтягувало зразки було постійним, становивши 48 Н (умовні напруги, які виникають за 13 Н/мм², дорівнювали приблизно 6% від σ_B).

Для визначення фізико-механічних характеристик вимірювали електроопір 4-зондовим методом, механічні випробування проводили із записуванням діаграми розтягування на універсальній дослідницькій машині УТС-10

із системою мікрокомп'ютерного керування і максимальним навантаженням 10 000 Н (робоча довжина зразків під час випробування на розтягування складала 100 мм), мікротвердість вимірювали на приладі ПМТ-3 за навантаження 0,25 Н з фіксованим кроком у поздовжньому напрямку (1 мм) і поперечному (0,2 мм). Результати обробляли за допомогою програми "Statistica 5.5". Металографічний аналіз проводили на мікроскопі "Neophot-32" з використанням фотокамери "Nikon. Coolpix 2000".

Для визначення оптимального набору корисних властивостей застосовували підхід, який має назву матриці стандартизованих змінних, заснований на визначенні суми віднесених до найбільшого показника властивостей, отриманих після конкретного поєднання деформаційних процесів, яка розраховується за формулою (4):

$$\sum i = \frac{A_i}{A_{\max}} + \frac{B_i}{B_{\max}} + \dots + \frac{C_i}{C_{\max}}, \quad (4)$$

де A_i, B_i, C_i – значення окремих властивостей i -го зразка, отримані після конкретної деформаційної обробки; $A_{\max}, B_{\max}, C_{\max}$ – максимальне значення кожної властивості.

Найбільше значення суми вказує на найкраще поєднання комплексу властивостей, тобто дотримується напрямком оптимізації. Однак треба враховувати, що в нашому разі небажане зростання значень електричного опору матеріалу, тобто під час розрахунку суми значення цієї характеристики будемо враховувати зі знаком «-» (табл. 1).

Таким чином, під час деформування прутків з міді марки М1 з різним сполученням кількості обертів за й проти годинникової стрілки з однаковим загальним ступенем деформації ϵ фор-

Таблиця 1

Визначення набору корисних властивостей за методом матриці стандартизованих змінних

№ зразка	N_1 , обороти	N_2 , обороти	N_1+N_2 , обороти	ϵ , %	σ_r , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	$\rho \times 10^{-8}$, Ом×м	H_{ρ} , Н/мм ²	Σ_i
0 (вихідний стан)	0	0	0	0	0,689	0,602	0,771	0,799	1,712
1	25	0	25	67	1	0,791	0,912	0,838	2,274
9	25	2	27	73	0,689	0,776	0,855	0,890	1,910
6	25	5	30	81	0,933	0,782	0,844	0,769	2,443
10	15	15	30	81	0,815	0,805	0,808	0,881	2,136
7	25	10	35	94	0,748	0,828	0,772	0,923	2,416
8	25	15	40	108	0,748	0,863	1	0,880	2,299
2	25	25	50	135	0,773	0,919	0,887	0,922	2,539
3	25	50	75	202	0,790	0,971	0,945	0,976	2,677
11	40	35	75	202	0,782	0,980	0,912	0,952	2,638
12	50	50	100	269	0,756	1	0,814	0,903	2,747
4	25	75	100	269	0,672	0,962	0,987	0,911	2,525
5	25	100	125	337	0,555	0,962	0,931	1	2,586

мується різний набір властивостей (наприклад, зразки № 3 і № 11; № 12 і № 4). Найкраще формування властивостей отримується під час використання деформації прутків з міді марки М1 одночасним розтягуванням з крутінням зі змінною напрямку обертання на протилежний, де $N_1 = N_2 = 50$ обертів (зразок № 12).

Також показано, що деформування з $N_1 = 25$ обертів, $N_2 = 10$ обертів (зразок № 7) дає змогу отримати найкращий (найменший) показник електричного опору (практично як у вихідному стані), при цьому відзначається загальне покращення властивостей на 41% порівняно з вихідним станом.

Відповідно до закону Відемана-Франца-Лоренца, відношення коефіцієнта теплопровідності до електропровідності металів пропорційне температурі за формулою (5):

$$\frac{K}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3e^2} \times k_B^2 T, \quad (5)$$

де K – коефіцієнт теплопровідності; σ – електропровідність; e – елементарний електричний заряд; k_B – стала Больцмана; T – температура;

$L = \frac{\pi^2}{3e^2} \times k_B^2$ – стала Лоренца.

Як бачимо, зростання електропровідності прямо пропорційне теплопровідності.

Таким чином, для вдосконалення конструкції саморятівників шахтних ізолюючих на хімічно зв'язаному кисні для виготовлення їх теплогазорозподільників і тепловологообмінників найдоцільніше використання прутки з міді марки М1, що деформовані за схемою, де $N_1 = 25$ обертів, $N_2 = 10$ обертів.

Для визначення процесів, що відбуваються в деформованому об'ємі прутків, розглянемо мікроструктуру зразка № 7 (рис. 1).

Згідно з рис. 1, під час комбінованої деформації розтягуванням з крутінням ($N_1 = 25$ обертів, $N_2 = 10$ обертів) мікроструктура стає повністю рекристалізованою по всьому поперечному перерізу зразка і в центральних областях його поздовжнього перерізу. На поверхні поздовжнього перерізу зразка вже відбувся процес збиральної рекристалізації, після якого в структурі знову з'явилися великі зерна, які практично звільнилися від субструктур (рис. 1, б).

Рекристалізація приводить до падіння електричного опору до значень вихідного недеформованого стану. Проведені дослідження зміни

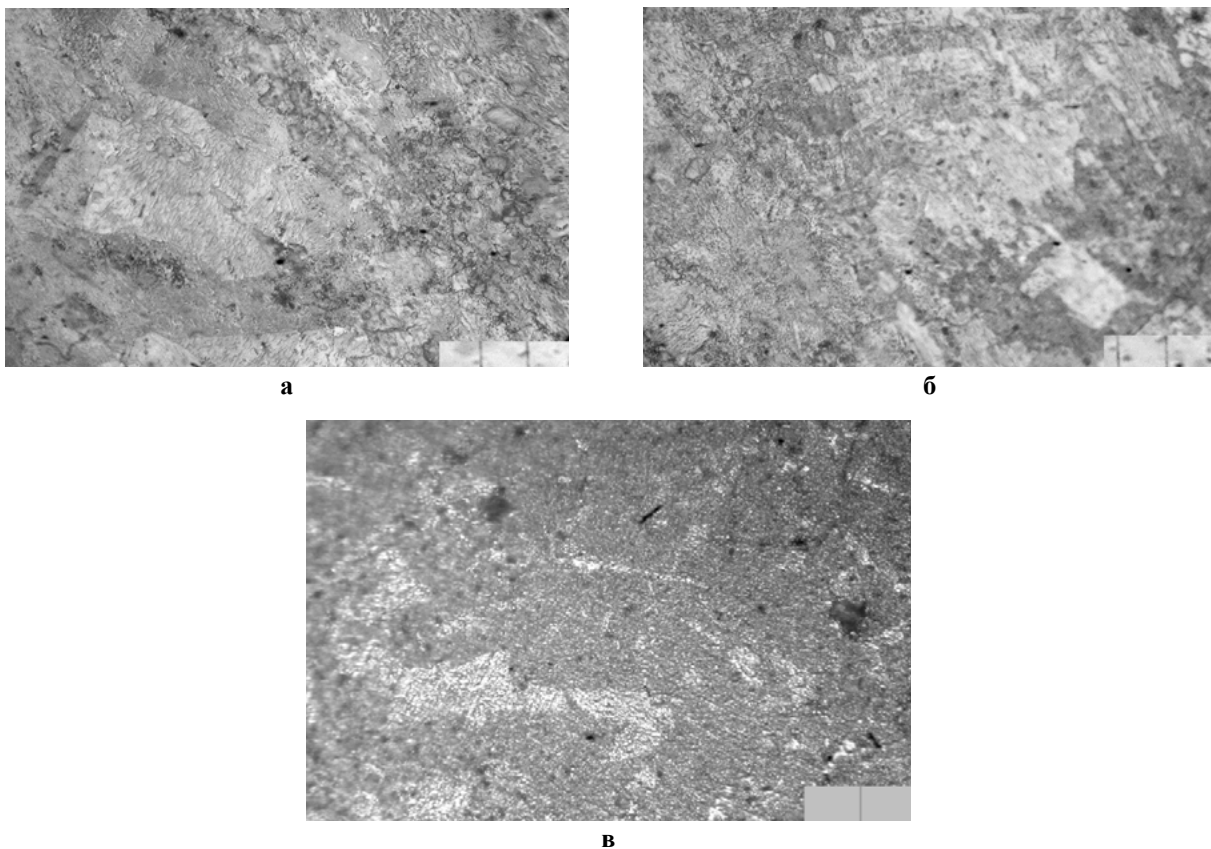


Рис. 1. Мікроструктура зразка № 7 з міді марки М1, що піддавався комбінованій деформації розтягуванням з крутінням ($N_1 = 25$ обертів, $N_2 = 10$ обертів); розподіл між ділянками 10 мкм: а – поздовжній переріз у центрі зразка; б – поздовжній переріз на поверхні зразка; в – поперечний переріз

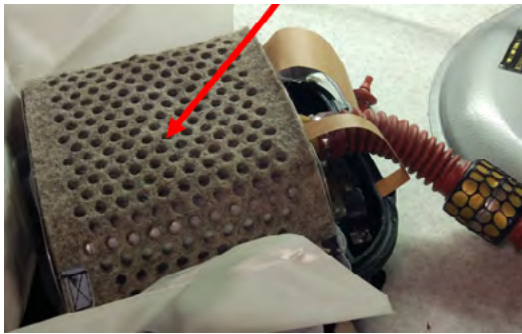


Рис. 2. Саморятівник шахтний ізолюючий на хімічно зв'язаному кисні (стрілкою вказано на регенеративний патрон)

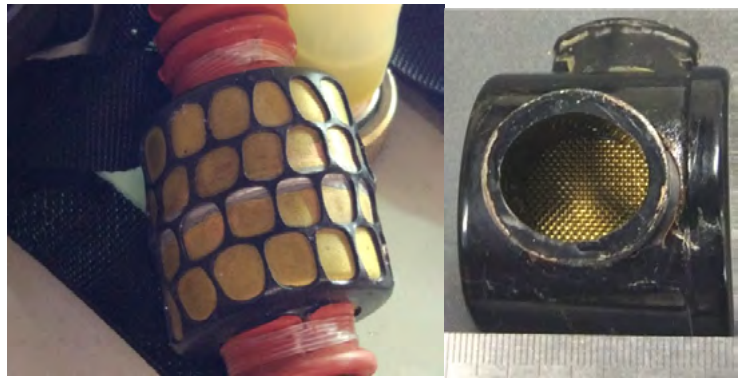


Рис. 3. Види тепловологообмінників

значень електричного опору після реалізації різних варіантів комбінованого пластичного деформування засвідчують, що зміна напрямку обертання на протилежний приводить до зниження значень електричного опору. У зразка № 7 значення електричного опору ($\rho = 1,948 \text{ Ом}\times\text{м}$) практично наблизилось до значення вихідного стану ($\rho = 1,945 \text{ Ом}\times\text{м}$), що також вказує на протікання процесу рекристалізації.

Нами доведено, що комбінована пластична деформація розтягуванням з одночасним крутінням зі зміною напрямку обертання на протилежний дала змогу отримати прутки міді марки М1 з унікальним комплексом властивостей. При цьому відбулося підвищення показників міцності (табл. 1), а також полегшилося протікання пластичної деформації, що пов'язано з більшою анігіляцією дефектів кристалічного походження, особливо крапкових. Ці результати підтверджені визначенням електроопору.

Таким чином, для усунення проблем, які впливають на комфортний мікроклімат користувачів та експлуатаційні характеристики саморятівників шахтних ізолюючих на хімічно зв'язаному кисні, пропонуються такі технічні рішення (пропозиції) щодо використання комбіновано деформованих розтягуванням з крутінням ($N_1 = 25$ обертів, $N_2 = 10$ обертів) прутків з міді марки М1 (далі – деформовані мідні прутки).

1) Створення умов для найбільш повного використання усієї маси кисневмісного продукту і відведення тепла за рахунок розділення продукту в регенеративному патроні теплогазорозподільниками з деформованих мідних прутків з високою теплопровідністю (рис. 2).

2) Застосування деформованих мідних прутків з високою теплопровідністю у тепловологообміннику, який розташовується між лицевою частиною (загубником) і регенеративним патроном саморятівника.

Висновки і перспективи подальших досліджень у цьому напрямі. Пропонується використання прутків з міді марки М1, які комбіновано деформовані розтягуванням з крутінням із зміною напрямку обертання на протилежний, де кількість обертів в один бік (N_1) дорівнює 25, а кількість обертів в протилежний бік (N_2) – 10.

Теплогазорозподільники в регенеративному патроні саморятівників шахтних ізолюючих на хімічно зв'язаному кисні з деформованих мідних прутків з високою теплопровідністю створюють умови для найбільш ефективного використання й відведення тепла усієї маси кисневмісного продукту та збільшують час захисної дії.

Застосування деформованих мідних прутків з високою теплопровідністю у тепловологообміннику, який розташовується між лицевою частиною (загубником) і регенеративним патроном саморятівника, дає змогу знизити температуру вдихуваної ГДС.

Запропоновані зміни конструкції регенеративного патрона й схеми повітропровідної частини саморятівників шахтних ізолюючих на хімічно зв'язаному кисні не тільки покращують температурний режим регенеративного патрона, перешкоджають спіканню і наближають фактичний ступінь відпрацювання продукту до теоретичного, але й збільшують теоретичну (отже, практичну) ступінь відпрацювання продукту, який містить кисень, що дає змогу істотно збільшити час захисної дії саморятівників шахтних ізолюючих на хімічно зв'язаному кисні, не збільшуючи ні масу, ні сорбційну ємність кисневмісного продукту.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розроблення конструкції теплогазорозподільників і тепловологообмінників саморятівників з використанням деформованих за визначеною схемою прутків з міді марки М1 та випробування удосконалених апаратів в умовах акредитованих лабораторій.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Єхилевський С.Г. Підвищення ресурсу дихальних апаратів на хімічно пов'язаному кисні : дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.26.01. Дніпропетровськ, 2002. 283 с.
2. Підвищення ефективності роботи рятувальників в засобах індивідуального захисту : Звіт про науково-дослідну роботу МНС України, Національного університету цивільного захисту України, № держреєстрації 0111U002447. 2012. 328 с. URL: https://www.dsns.gov.ua/files/2017/4/25/zvit_osvita_i_nauka/4_%D0%97%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%B1%D0%B8%20%D1%96%D0%BD%D0%B4%D0%B8%D0%B2%D1%96%D0%B4%D1%83%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%B7%D0%B0%D1%85%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%83.pdf.
3. Пак В.В., Єхилевський С.Г., Фоменко Т.П. Перспективи використання хімічно пов'язаного кисню в індивідуальних засобах захисту дихання. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2001. № 2. С. 49–51.
4. Єхилевський С.Г. Схеми воздухопроводной части и степень отработки регенеративных патронов шахтных дыхательных аппаратов. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2000. № 4. С. 60–64.
5. Ильинский Э.Г., Бурего Н.Н., Зборщик Л.А. Повторное использование регенеративного продукта изолирующих самоспасателей. *Горноспасательное дело*. 2010. Вып. 47. С. 152–159.
6. Pelders J.J., de Ridder J.H. Assessment of the ergonomic design of self-contained self-rescuer (SCSR) devices for use by women in mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2020. Vol. 120. №. 5. P. 307–312. DOI: <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/1054/2020>.
7. Adjiski V., Despodov Z., Serafimovski D., Mijalkovski S. System for prediction of carboxyhemoglobin levels as an indicator for on-time installation of self-contained self-rescuers in case of fire in underground mines. *GeoScience Engineering*. 2019. Vol. LXV. № 4. P. 23–37. DOI: <https://doi.org/10.35180/gse-2019-0021>.
8. Єхилевський С.Г., Ольшанников С.А. Оптимизация теплового режима шахтного самоспасателя на химически связанном кислороде. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2013. С. 35–42. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_20310680_20068642.pdf.
9. Овчаров В.К., Ильинский Э.Г., Конопелько Е.И., Зборщик Л.А. Индивидуальные средства защиты органов дыхания с химически связанным кислородом. URL: <http://ea.donntu.edu.ua/handle/123456789/19369>.
10. Диденко Н.С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ. Москва : Недра, 1990. 158 с.
11. Гудков С.В. Дворецкий С.И., Путин С.Б., Таров В.П. Изолирующие дыхательные аппараты и основы их проектирования : учебное пособие. Москва : Машиностроение, 2008. 188 с.
12. Ферапонтов Ю.А. и др. Синтез надперекиси калия. *Проблемы химии и химической технологии : труды VIII региональной конференции*. Воронеж, 2000. С. 340–345.
13. Гладышев Н.Ф. и др. Регенеративные продукты нового поколения: технология и аппаратное оформление : монография. Москва : Машиностроение-1, 2007. 156 с.
14. Єхилевський С.Г. Математическая модель шахтного самоспасателя с маятниковой схемой воздухопроводной части. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2000. № 6. С. 46–49.
15. Єхилевський С.Г. Резервы более полного использования химически связанного кислорода в шахтных дыхательных аппаратах. *Известия Донецкого горного института*. 1998. № 1. С. 17–26.
16. Особенности формирования деформационной структуры в ГЦК-металлах в интервале температур 0,05–0,5 Тпл / С.Н. Каверина, Э.П. Печковский, Г.Ф. Саржан, С.А. Фирстов. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2002. № 2. С. 251–269.
17. Варюхин В.Н. и др. Накопление интенсивных пластических деформаций в меди при гидроэкструзии с кручением. *Металлы*. 2001. № 4. С. 79–84.

REFERENCES:

1. Yekhylevskiy S.H. (2002). Pidvyshchennia resursu dykhalnykh aparativ na khimichno poviazanomu kysni: dys. doktora tekhn. nauk: 05.26.01. Dnipropetrovsk, 2002. 283 p.
2. Pidvyshchennia efektyvnosti roboty riaturalnykh v zasobakh indyvidualnoho zakhystu: zvit pro naukovo-doslidnu robotu MNS Ukrainy, Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrainy № derzhreiestratsii 0111U002447 (2012). 328 p. URL: https://www.dsns.gov.ua/files/2017/4/25/zvit_osvita_i_nauka/4_%D0%97%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%B1%D0%B8%20%D1%96%D0%BD%D0%B4%D0%B8%D0%B2%D1%96%D0%B4%D1%83%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%B7%D0%B0%D1%85%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%83.pdf.

3. Pak V.V., Ehilevskij S.G. and Fomenko T.P. (2001). Perspektivy ispol'zovanija himicheski svjazannogo kisloroda v individual'nyh sredstvah zashhity dyhanija. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal*. № 2. P. 49–51.
4. Ehilevskij S.G. (2000). Shemy vozduhovodnoj chasti i stepen' otrabotki regenerativnyh patronov shahtnyh dyhatel'nyh apparatov. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal*. № 4. P. 60–64.
5. Il'inskij Je.G., Burego N.N. and Zborshhik L.A. (2010). Povtornoje ispol'zovanie regenerativnogo produkta izolirujushhijh samospasatelej. *Gornospasatel'noe delo*. Vol. 47. P. 152–159.
6. Pelders J.J. and de Ridder J.H. (2020). Assessment of the ergonomie design of self-contained self-rescuer (SCSR) devices for use by women in mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. Vol. 120. № 5. P. 307–312. doi: <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/1054/2020>.
7. Adjiski V., Despodov Z., Serafimovski D. and Mijalkovski S. (2019). System for prediction of carboxyhemoglobin levels as an indicator for on-time installation of self-contained self-rescuers in case of fire in underground mines. *GeoScience Engineering*. Vol. LXV, № 4. P. 23–37. doi: <https://doi.org/10.35180/gse-2019-0021>.
8. Ehilevskij S.G. and Ol'shannikov S.A. (2013). Optimizacija teplovogo rezhima shahtnogo samospasatelja na himicheski svjazannom kislorode. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal*. P. 35–42. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_20310680_20068642.pdf.
9. Ovcharov V.K., Il'inskij Je.G., Konopel'ko E.I., Zborshhik L.A. Individual'nye sredstva zashhity organovyh dyhanij s himicheski svjazannym kislorodom. URL: <http://ea.donntu.edu.ua/handle/123456789/19369>.
10. Didenko N.S. (1990). Regenerativnye respiratory dlja gornospasatel'nyh robot. M.: Nedra. 158 p.
11. Gudkov S.V. Dvoreckij S.I., Putin S.B. and Tarov V.P. (2008). Izolirujushhie dyhatel'nye apparaty i osnovy ih proektirovanija: ucheb. posob. M.: Mashinostroenie. 188 p.
12. Sintez nadperekisi kalija (2000) / Ju.A. Fera-pontov i dr. *Trudy VIII regional'noj konf. "Problemy himii i himicheskoj tehnologii"*. Voronezh. P. 340–345.
13. Regenerativnye produkty novogo pokolenija: tehnologija i apparaturnoe oformlenie: monografija (2007) / N.F. Gladyshev i dr. M.: Mashinostroenie-1, 156 p.
14. Ehilevskij S.G. (2000). Matematicheskaja model' shahtnogo samospasatelja s majatnikovoj she-moj vozduhovodnoj chasti. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal*. №6. P. 46–49.
15. Ehilevskij S.G. (1998). Rezervy bolee polnogo ispol'zovanija himicheski svjazannogo kisloroda v shahtnyh dyhatel'nyh apparatah. *Izvestija Doneckogo gornogo instituta*. № 1. P. 17–26.
16. Osobennosti formirovanija deformacionnoj struktury v GCK-metallah v intervale temperatur 0,05–0,5 Tpl (2002) / S.N. Kaverina, Je.P. Pechkovskij, G.F. Sarzhan, S.A. Firstov. *Metallofizika i novejshie tehnologii*. № 2. P. 251–269.
17. Nakoplenie intensivnyh plasticheskijh deformacij v medi pri gidrojekstruzii s krucheniem (2001) / V.N. Varjuhin i dr. *Metally*. № 4. P. 79–84.

Стаття надійшла до редакції 11.05.2021