

УДК 621.81:621.337

# СОВРЕМЕННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КОММУТАЦИОННОЙ И СВАРОЧНОЙ ТЕХНИКИ

## Сообщение 2. Применение методов высокоскоростного испарения в вакууме для изготовления электрических контактов и электродов

Н.И. ГРЕЧАНЮК<sup>1</sup>, В.Г. ГРЕЧАНЮК<sup>2</sup>, Е.В. ХОМЕНКО<sup>1</sup>, И.Н. ГРЕЧАНЮК<sup>1</sup>, В.Г. ЗАТОВСКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ин-т проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины. 03680, г. Киев, ул. Кржижановского, 3.  
E-mail: homhelen@mail.ru

<sup>2</sup>Киевский нац. ун-т строительства и архитектуры. 03037, г. Киев, Водухофлотский просп., 31.  
E-mail: knuba@knuba.edu.ua

В статье представлен метод электронно-лучевого испарения–конденсации в вакууме для наиболее перспективных технологий получения современных композиционных материалов, используемых в сварочной и коммутационной технике. В настоящее время этот метод является одним из составляющих технологического процесса получения тонких (до 5 мкм) пленок для радиотехники, микроэлектроники, вычислительной техники и др., а также толстых (более 5 мкм) пленок-конденсатов, широко используемых в качестве эффективных защитных и износостойких покрытий. Изложены результаты научной и производственной деятельности по внедрению в промышленность технологий нанесения на поверхность электрических контактов и электродов толстых пленок на основе меди и тугоплавких металлов (молибдена, вольфрама, хрома) с добавками редкоземельных и других металлов (иттрий, цирконий). По результатам проведенных испытаний на более чем 54 предприятиях Украины, России, Грузии, Румынии, Польши, КНР установлено, что по эксплуатационной надежности разработанные материалы не уступают серебросодержащим порошковым композициям, и в то же время они примерно в 3 раза дешевле последних. Библиогр. 57, табл. 1, рис. 4.

*Ключевые слова:* композиционные материалы, медь и тугоплавкие металлы, сварочная и коммутационная техника, электронно-лучевое испарение, пленки конденсатов, эксплуатационная надежность

Разработка физико-химических основ создания новых материалов — объективная необходимость технического и социального развития общества. Без этого невозможно достичь существенного прогресса ни в одном из важных направлений науки и техники. Исходя из оценки американских экспертов, в ближайшие 20 лет 90 % современных материалов будет заменено принципиально новыми, что приведет к технической революции практически во всех областях промышленности [1, 2]. Одним из прогрессивных направлений создания принципиально новых материалов с наперед заданными свойствами есть высокоскоростное электронно-лучевое испарение — конденсация металлических и неметаллических материалов в вакууме. Испарение и последующая конденсация материалов в вакууме — относительно новое направление в материаловедении [3].

В настоящее время ни одна область техники, связанная с получением и обработкой материалов, не обходится без электронно-лучевого направления. Это объясняется наиболее высокой эффективностью электронного луча по сравнению с другими известными концентрированными потоками энергии (лазером, плазмой). Электронный луч имеет наибольший коэффициент поглощения

энергии. Диапазоны мощности и концентрации энергии в луче значительны (мощность электронных лучей — 1 МВт и более). В этой связи нагрев материала до заданных температур плавления и испарения происходит с очень высокими скоростями [4].

Электронно-лучевое испарение–конденсация в вакууме является одним из составляющих технологического процесса получения тонких (до 5 мкм) пленок для радиотехники, микроэлектроники, вычислительной техники и др. [5], а также толстых (более 5 мкм), используемых в качестве эффективных защитных и износостойких покрытий [6–10].

Перспективным является создание многокомпонентных покрытий, предназначенных для повышения эрозионной стойкости электрических контактов коммутационных аппаратов. Научный и производственный опыт, приобретаемый при разработке покрытий из сплавов на основе меди, легированных оловом, хромом, алюминием, никелем, титаном обобщен в монографии [11].

О возможности применения высокопрочных пленок системы Cu–0,5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (тут и далее мас. %) в качестве покрытий изделий электротехнического назначения отмечается в работе [12].

© Н.И. Гречанюк, В.Г. Гречанюк, Е.В. Хоменко, И.Н. Гречанюк, В.Г. Затовский, 2016

Установлено, что осажденные в вакууме покрытия значительно превосходят соответствующие гальванические по уровню износостойкости и, особенно, температурной стабильности.

Несмотря на очевидные преимущества, вакуумные покрытия не всегда экономически оправданы, поскольку коэффициент использования пара обычно не превышает 10...15 %. В то же время из-за разности упругости паров компонентов возникают непреодолимые трудности при испарении из одного источника материалов на основе меди или серебра с добавками тугоплавких металлов: вольфрама, молибдена, тантала, ниобия, циркония в том или ином соотношении, соответствующем составу современных электроконтактных материалов.

Как известно, традиционными методами получения композиционных материалов (КМ) для электрических контактов являются методы порошковой металлургии. Технологические особенности получения материалов для электрических контактов, их эксплуатационные характеристики и области применения приведены в публикациях [13–20]. Последние достижения в этой области материаловедения обобщены в работе [21].

Несмотря на широкий выбор материалов для коммутационной и сварочной техники проблема создания высоконадежных КМ так до конца и не решена, поскольку требования, предъявляемые к материалу контактов, зависят от типа коммутационного аппарата и изменяются по мере его совершенствования и замены новым. Аналогичные требования существуют и для КМ, используемых в сварочной технике. Удовлетворить эти требования могут материалы, характеризующиеся оптимизированной структурой и соответствующим комплексом свойств, обеспечивающие формирование в рабочем слое «вторичной структуры» с повышенными электроэрозионной стойкостью, сроком службы и надежностью.

Определяющее влияние на эксплуатационные характеристики материалов электрических контактов и электродов оказывает структурный фактор. Повышение дисперсности КМ в системе Ag–Me, Ag–MeO способствует снижению интенсивности плазменных потоков, увеличению электроэрозионной стойкости контактов и электродов из этих материалов [22].

Процессы испарения и конденсации позволяют конструировать материалы на атомно-молекулярном уровне и, как результат, прецизионно регулировать их дисперсность. В этой связи значительный научный и практический интерес представляет использование высокоскоростного электронно-лучевого испарения и последующей конденсации металлов в вакууме для получения

массивных конденсированных КМ для электрических контактов и электродов. Конденсированные из паровой фазы КМ на основе чистых металлов и их сплавов, оксидов, карбидов, боридов, КМ дисперсно-упрочненного, микрослойного и микропористого типов толщиной 0,1...2,0 мм с 1970-х годов исследуются в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины [23], Королевском авиационном научно-исследовательском институте Министерства обороны Великобритании [24], ряде других научно-исследовательских лабораторий [25]. Результаты этих исследований обобщены в работах [26, 27]. Однако о промышленном выпуске подобных материалов как отдельных конструктивных элементов узлов, приборов и механизмов до последнего времени ничего не было известно.

Наибольший интерес представляет разработка и широкое внедрение в различные отрасли техники конденсированных из паровой фазы КМ для контактов и электродов, не содержащих благородных металлов. Следует отметить, что материалы, полученные методами порошковой металлургии без благородных металлов, широко распространены в производстве электродов и контактов коммутационных аппаратов. Порошковые КМ для этих контактов и электродов содержат 20...80 % тугоплавкой составляющей (как правило, это вольфрам, молибден и хром), а легкоплавкой является медь. Технологическими добавками могут быть никель, кобальт, функциональными — некоторые оксиды, бор и другие элементы и соединения. В промышленности в основном применяют порошковые КМ с содержанием 50 и 70 % тугоплавкой фазы [15, 28].

При использовании контактов и электродов из КМ системы W–Cu продуктами окисления чаще всего являются оксиды  $WO_3$  и  $Cu_2O$  [16, 29]. Их удельное электросопротивление изменяется в довольно широких пределах: для  $WO_3$  от 1 (при сильном отклонении) до  $1 \cdot 10^{12}$  Ом/см (при стехиометрическом составе), для  $Cu_2O$  — от  $10^3$  до  $10^{10}$  Ом/см.

При коммутации тока на воздухе подобные процессы наблюдаются и в рабочем слое контактов из псевдосплавов Mo–Cu. Молибден и медь взаимно ограниченно растворимы [30], в то время как их оксиды взаимодействуют и образуют стойкие соединения ( $CuMoO_4$ ,  $Cu_3Mo_2O_9$ ) [31, 32]. При температуре выше 700 °C возникает легкоплавкая эвтектика в системе  $MoO_3$ – $Cu_2O$ . Установлено, что оксидная пленка, имеющая состав эвтектики этой системы, легко растекается по поверхности контакта, заполняя неровности [31, 32]. Пленка имеет слабую адгезию к основе и ее отслаивание после кристаллизации от поверхности контакта способствует эффекту «самоочистки»

и снижению уровня переходного сопротивления контактной пары [28].

При решении проблемы получения из паровой фазы композитов для электрических контактов и электродов был выполнен ряд научных и прикладных исследований по разработке КМ на основе меди, молибдена, вольфрама и хрома, которые включали:

- выбор легирующих элементов и разработку процессов их введения в медную матрицу для получения двух- и многокомпонентных КМ на основе меди с повышенными физико-химическими, механическими и коррозионными характеристиками;

- исследование влияния межфазного взаимодействия в системе медь–тугоплавкая составляющая, материала, температуры и шероховатости подложки на структуру и свойства КМ;

- анализ изменения структуры и свойств КМ в зависимости от химического состава исходных (испаряемых) компонентов и скорости их осаждения; обоснование выбора материала разделительного шара;

- изучение влияния легирующих фаз на повышение скорости испарения меди и определение оптимального состава легирующих добавок;

- проведение комплексных исследований структуры, физико-химических и механических свойств градиентных двух- и многокомпонентных КМ на основе меди, полученных на стационарной и вращающейся подложках;

- проведение комплексных коррозионных исследований КМ и определение механизмов протекания коррозионных процессов;

- выдачу рекомендаций коррозионностойких конденсированных с паровой фазы КМ на основе меди, создание промышленного оборудования и технологий их производств.

Основные результаты проведенных фундаментальных, научных и прикладных исследований изложены в работах [33–35] и обобщены в [36]. Итоги выполнения указанных выше работ можно обозначить следующим образом. Сформулированы физико-химические принципы конструирования конденсированных из паровой фазы КМ на основе меди, которые позволили осуще-

ствить переход от лабораторных исследований к их широкому промышленному применению. Проведены комплексные исследования структуры, физико-химических, механических и эксплуатационных свойств КМ Cu–Mo, Cu–W, Cu–Cr, (CuZrY)–Mo в интервале концентраций тугоплавких компонентов до 50 %; проведены комплексные исследования коррозионной стойкости двух- и многокомпонентных КМ и рассчитаны баллы их коррозионной стойкости; установлено образование пересыщенных твердых растворов в КМ Cu–W, Cu–Mo, Cu–Cr на субмикронном уровне, что приводит в результате их распада к формированию слоистой структуры. Впервые предложено легировать медную матрицу цирконием и иттрием с общим их содержанием в КМ до 0,1 % путем испарения меди через ванну-посредник из сплава Cu–Zr–Y, что обеспечило одновременное повышение коррозионной стойкости КМ и скорости испарения меди в 2...3 раза и экспериментально показано, что конденсированные из паровой фазы КМ Cu–0,1(Zr,Y)–(8...12)Mo и КМ Cu–0,1(Zr,Y)–(0,3...0,34)Cr–(8...12)Mo представляют собой объемные нанокристаллические системы.

**Конденсированные из паровой фазы КМ Cu–Zn–Y–Mo.** Наибольшее промышленное применение нашли системы Cu–Zn–Y–Mo [33, 36, 37].

Химический состав и основные физико-механические свойства указанных материалов приведены в табл. 1.

Новые композиты, получившие название материалы дисперсно-упрочненные для электрических контактов (МДК) сертифицированы в соответствии с украинскими стандартами [38, 39]. Химический состав и технология их изготовления защищены патентами Украины и Российской Федерации [40–42].

Конденсированные из паровой фазы КМ на основе меди, молибдена и вольфрама характеризуются слоистой структурой с иерархией слоев на макро-, микро- и субмикронном уровне (рис. 1).

При небольшой концентрации молибдена (до 7...8 %), вольфрама (до 4 %) слоистость слабо выражена. С повышением содержания тугоплавкого составляющего контраст изображения уве-

Т а б л и ц а 1. Химический состав и физико-механические свойства КМ Cu–Zr–Y–Mo

Материал	Химический состав материала, мас. %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Удельное электросопротивление, мкОм·м	Твердость HV, МПа	Механические свойства			
					до отжига		после отжига в вакууме 900 °С, 1 ч	
					σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %	σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %
МДК-1	Cu-(0,05...0,1)(Zr,Y)-(3...5)Mo	8,9...9,0	0,021...0,022	1000...1500	300...430	10,3...7,3	295...420	17,6...9,3
МДК-2	Cu-(0,05...0,1)(ZrY)-(5,1...8)Mo	9,0...9,05	0,022...0,024	1500...1650	440...630	7,25...3,4	425...600	9,45...4,9
МДК-3	(Cu-0,05...0,1ZrY)-(8,1...12)Mo	9,05...9,1	0,024...0,028	1650...1800	635...785	3,25...1,8	605...730	4,85...3,9

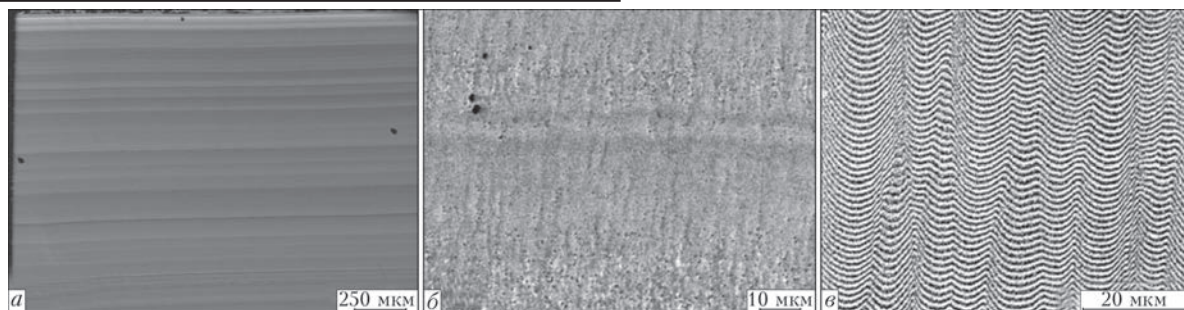


Рис. 1. Слоистая структура КМ на основе меди и молибдена на макро- (а), микро- (б) и субмикронном уровне (в)

личивается, что указывает на усиление слоистости, что обусловлено различными факторами. Наличие слоистости на макроуровне вероятней всего обусловлено возникновением электрических микропробоев, возникающих при высокоскоростном испарении исходных технически чистых компонентов (скорость осаждения меди на вращающуюся стальную подложку диаметром 1000 мм достигает 60...70 мкм/мин, молибдена – 6...8 мкм/мин). Слоистость на микроуровне вызвана примесями, присутствующими в исходных (испаряемых) материалах. Возникновение слоев на субмикронном уровне связано с образованием пересыщенных твердых растворов, которые, распадаясь, формируют соответствующие микрослои [36]. Коммутационные испытания показали, что в таком градиентном слоистом наноматериале изменения химического состава слоев существенно ограничивают зону термического влияния разряда. В ряде типов коммутационных аппаратов и приборов наблюдаются меньшие изменения рабочего слоя контактов и электродов и повышение эрозионной стойкости по сравнению с аналогами, полученными методами порошковой металлургии.

Наиболее эффективные области применения МДК – городской транспорт (контакты, используемые в городских трамваях, троллейбусах, поездах метро; междугородный электротранспорт, тепловозы, электропоезда; лифтовое хозяйство (пассажирские и грузовые лифты); портовые, корабельные краны и другие подъемно-транспортные механизмы; электрокары всех типов; гор-



Рис. 2. Общий вид типичных разрывных контактов, изготовленных с применением материалов МДК

но-шахтное оборудование: промышленные и бытовые электротехнические устройства, содержащие реле, пускатели, контакторы, рубильники и т.п.

Общий вид разрывных контактов, изготовленных с применением материалов МДК, представлен на рис. 2.

Композиционные материалы МДК-3 нашли промышленное применение в качестве электродов для сварки латунной ленты с медной проволокой на конденсаторных точечных машинах типа ТКМ 15 и ТКМ 17. Ниже приведены результаты испытаний электродов на предприятии «Шосткинский казенный завод «Импульс».

Фактический ресурс работы электродов, изготовленных из материала МДК-3 (плановый ресурс работы 100000 циклов):

- № 1 (верхний электрод на ТКМ 15) — 105000;
- № 2 (нижний электрод на ТКМ 15) — 120000;
- № 3 (верхний электрод на ТКМ 17) — 110000;
- № 4 (нижний электрод на ТКМ 15) — 125000.

Электроды, изготовленные из композиционного материала МДК-3, соответствуют всем требованиям, предъявляемым к электродам, используемым на конденсаторных точечных машинах типа ТКМ 15 и ТКМ 17.

Принципиально новым применением материалов МДК-3 стало их использование в качестве электродов для сварки живых тканей [43]. Из указанных материалов освоено выпуск мундштуков для сверхзвукового электродугового напыления. Перспективным является замена материалами МДК бериллиевой бронзы. В отличие от бронзы КМ марки МДК не теряют прочности вплоть до температуры нагрева до 900 °С. Указанные КМ также могут быть использованы как пружинные сплавы с высокой электропроводностью, сплавы, стойкие к радиационному распуханию, и как покрытия на зеркалах силовой металлооптики [36].

**Конденсированные из паровой фазы КМ Cu–Cr–Zr–Y–Mo.** Композиционные материалы Cu–(0,2...0,41)Cr–(0,05...0,1)(Zr,Y)–(8...12)Mo (марка МДК3Х) являются оптимизированным вариантом МДК3. Экспериментально подтверждено, что КМ Cu–(0,05...0,1)(Zr,Y)–(8...12)Mo представляют собой объемные нанокристаллические мате-

риалы со средними размерами зерна: меди 80 нм, молибдена 10 нм. Благодаря дополнительному легированию хромом МДКЗХ отличаются в 1,5...2,0 раза более высокой коррозионной стойкостью по сравнению с МДКЗ при сохранении уровня физико-механических свойств последних [44]. Они в основном используются для изготовления разрывных контактов горно-шахтного оборудования, где влажность достигает более 80 % и присутствуют агрессивные газы  $\text{CO}_2$  и  $\text{SO}_2$ , в частности, на Смолинской и Ингульской шахтах по добыче урана.

**Конденсированные из паровой фазы КМ Cu–Zr–Y–C.** Композиционные материалы Cu–(0,05...0,1)(Zr, Y)–(0,3...0,6)C (марка МДКЗС) используются в промышленном масштабе для изготовления скользящих контактов [45, 46]. Пантографы из данных материалов (рис. 3) нашли применение в локомотивах, обеспечивающих движение вагонеток с медной рудой на медно-рудном комбинате (Люблин, Польша).

**Конденсированные из паровой фазы КМ Cu–(0,05...0,1)(Zr, Y)–W.** Структура, физико-химические, механические и эксплуатационные свойства композитов с содержанием вольфрама до 50 % подробно описаны в работах [47–50]. Композиционные материалы на основе меди и вольфрама традиционно используются в качестве сильноточных электрических контактов масляных выключателей. В последнее время они также находят применение в некоторых типах вакуумных приборов. В частности, конденсированные из паровой фазы КМ Cu–(0,5...0,1)(Zr, Y)–(32...36)W нашли промышленное применение для изготовления контактов масляных выключателей типа РНО и РНТ-17. Указанные материалы прошли успешную опытно-промышленную апробацию в вакуумных дугогасительных камерах МВК-440, которые, в основном, используются в угольных шахтах [51].

**Конденсированные из паровой фазы КМ Cu–(0,05...0,1)(Zr, Y)–Cr.** Влияние технологических факторов на структуру и механические свойства конденсированных из паровой фазы КМ Cu–

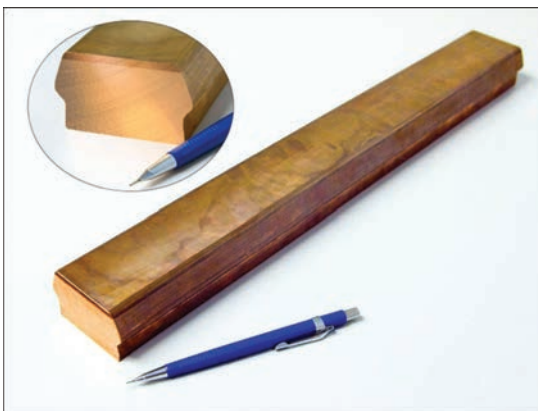


Рис. 3. Общий вид скользящих контактов, изготовленных из материала МДКЗС

Zr–Y–Cr с содержанием хрома до 60 % описано в работе [52]. КМ Cu–Cr с содержанием 35...50 % хрома широко используют для изготовления контактов вакуумных дугогасительных камер.

Возможность использования конденсированных КМ этой системы обусловлена особенностями химического состава и морфологии «вторичной» структуры, образующейся на рабочей поверхности контактов. В неравновесных условиях дугового разряда в рабочем слое увеличивается взаимная растворимость меди и хрома и происходит распад твердых растворов с формированием дисперсной структуры. Конденсаты Cu–Zr–Y–Cr при этом содержании хрома имеют слоистую структуру на макро-, микро- и субмикроуровнях. Слоистость последних двух уровней обусловлена анизотропией нормального роста зерен, способствующей формированию «столбчатости» в пределах нескольких слоев конденсата, в которых под воздействием температуры и времени в сечении слоя, перпендикулярном столбцам, образуется структура с полигональной формой зерен (рис. 4, а) и признаками расслоения твердого раствора (рис. 4, б).

Изменение твердости (по Виккерсу) в зависимости от содержания хрома имеет линейный характер, в интервале концентраций 35...50 % Cr твердость изменяется в пределах 2069...2503 МПа. При испытании на растяжение предел прочности увеличивается до 550 МПа, однако КМ при этом

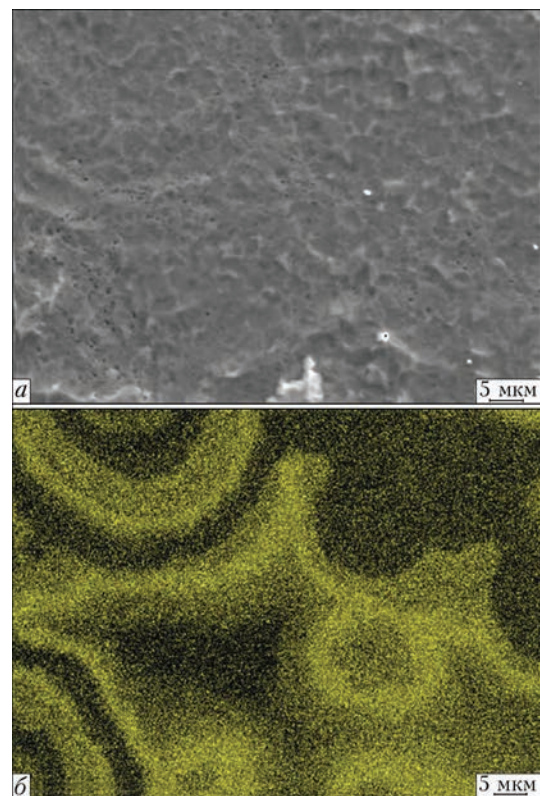


Рис. 4. Микроструктура КМ Cu–Zr–Y–Cr с содержанием хрома 35...50 %: во вторичных электронах (а) и в рентгеновских лучах меди (б)

имеет нулевую пластичность. КМ Cu–Zr–Y–Cr находят применение для изготовления контактов дугогасительных камер [53, 54].

Конденсированные из паровой фазы КМ отличаются рядом достоинств: их получают за один технологический цикл, они дешевле аналогов, получаемых методами порошковой металлургии (в 1,5...1,7 раза) и существенно (в 4 раза) дешевле материалов серебросодержащих контактов. По эксплуатационной надежности конденсированные КМ не уступают материалам на основе серебросодержащих композиций. Они хорошо обрабатываются резанием, шлифованием, сверлением, легко паяются любыми из известных способов пайки с использованием стандартных серебросодержащих и бессеребряных припоев. Создано промышленное сертифицированное электронно-лучевое оборудование для производства КМ, конденсированных из паровой фазы [55, 56], которое позволяет изготавливать до 12 т в год композитов различного химического состава. За период с 1995 по 2015 гг. получено более 15 т КМ, из которых произведено около 1,6 млн контактов и электродов 386 типоразмеров [57].

### Выводы

Создано промышленное электронно-лучевое оборудование для производства конденсированных из паровой фазы КМ на основе меди, молибдена, вольфрама и хрома, используемых при изготовлении электрических контактов и электродов.

Проведенные более чем на 54 предприятиях Украины, России, Грузии, Румынии, Польши, КНР испытания показали, что по эксплуатационной надежности разработанные материалы не уступают серебросодержащим порошковым композициям и в то же время они примерно в 3 раза дешевле последних.

1. *Новые материал* / Под ред. Ю.С. Коробасова. – М.: МИСИС, 2002. – 736 с.
2. *Материаловедение. Технологии конструкционных материалов* / Под ред. В.С. Чередниченко. – М.: Омега-Л, 2008. – 751 с.
3. *Bunshah R.F. Vacuum evaporation – history. Recent developments and application // Zeitschrift für Metallkunde.* – 1984. – 75, № 11. – P. 840–846.
4. *Зувев И.В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии.* – М.: МЭИ, 1998. – 162 с.
5. *Технология тонких пленок. Справочник* / Под ред. Л. Майсела и З. Гленга. – М.: Сов. радио, 1997. – Т. I. – 662 с. – Т. 2. – 764 с.
6. *Самсонов Г.В., Эпик А.П. Тугоплавкие покрытия.* – М.: Металлургия, 1973. – 398 с.
7. *Шиллер З., Гайзиг Г., Панцер З. Электронно-лучевая технология.* – М.: Энергия, 1980. – 528 с.
8. *Мовчан Б.А., Малошенко И.С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме.* – Киев: Наук. думка, 1983. – 230 с.
9. *Повышение качества поверхности и плакирование металлов. Справочник* / Под ред. А. Кнаунирса. – М.: Металлургия, 1984. – 376 с.

10. *Елисеев Ю.С., Абрамов Н.В., Кримов В.В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиастроении.* – М.: Высш. шк., 1999. – 522 с.
11. *Косторжизкий А.И., Лебединский О.В. Многокомпонентные вакуумные покрытия.* – М.: Машиностроение, 1987. – 207 с.
12. *Ильинский А.И. Структура и прочность слоистых и дисперсно-упрочненных пленок.* – М.: Металлургия, 1986. – 140 с.
13. *Францевич И.Н. Электрические контакты, получаемые методом порошковой металлургии // Порошковая металлургия.* – 1980. – № 8. – С. 36–47.
14. *Раховский В.И., Левченко Г.В., Теодорович О.К. Разрывные контакты электрических аппаратов.* – М.: Металлургия, 1966. – 295 с.
15. *Степанные материалы для электротехники и электроники. Справочник* / Под ред. Г.Г. Гнесина. – М.: Металлургия, 1981. – 343 с.
16. *Материалы в приборостроении и автоматике. Справочник* / Под ред. Ю.М. Пятинина. – М.: Машиностроение, 1982. – 527 с.
17. *Композиционные материалы. Справочник* / Под ред. Д.М. Карпиноса. – Киев: Наук. думка, 1985. – 591 с.
18. *Тучинский Л.И. Композиционные материалы, получаемые методом пропитки.* – М.: Металлургия, 1998. – 206 с.
19. *Композиционные материалы для контактов и электродов* / Р.В. Минакова, М.Л. Грекова А.П., Кресанова, Л.А. Крячко // *Порошковая металлургия.* – 1995. – № 7/8. – С. 32–52.
20. *Slade Paul G. The Vacuum Interrupter. Theory, Design and Application.* – CRC Press, 2008. – 528 p.
21. *Хоменко Е.В., Гречанюк Н.И., Затовский В.Г. Современные композиционные материалы для коммутационной и сварочной техники. Сообщение 1. Порошковые композиционные материалы // Автомат. сварка.* – 2014. – № 10. – С. 38–44.
22. *Leis P., Schuster K.K. Der einfluss des kontaktmaterials auf die ausbildung von plasmastrahlen // Electric.* – 1979. – 33, № 10. – S. 541–516, 559.
23. *Мовчан Б.А., Гречанюк Н.И. Новые материалы и покрытия, получаемые по электронно-лучевым технологиям // Сб. тр. ЭЛТ-88 (31 мая–4 июня 1988 г., Варна, Болгария).* – Варна, 1988. – С. 1005–1023.
24. *Фаткуллин О.Х. Новые конструкционные порошковые материалы и их применение // Итоги науки и техники. Порошковая металлургия.* – М.: ВИНТИ, 1991. – Т. 5. – С. 140–177.
25. *Singh I., Wolfe D.E. Review Nano and macro-structured component fabrication by electron (EB-PVD) // J. of Materials Science.* – 2005. – 40. – P. 1–26.
26. *Демчишин А.В. Структура и свойства толстых вакуумных конденсаторов металлических и неметаллических материалов и научные основы их получения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук.* – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР, 1981. – 35 с.
27. *Гречанюк Н.И. Новые конструкционные материалы, полученные путем конденсации паровой фазы в вакууме для изделий новой техники: Дис. ... д-ра техн. наук.* – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР, 1988. – 520 с.
28. *Минакова Р.В., Кресанова А.П., Гречанюк Н.И. Композиционные материалы для контактов и электродов. Материалы на основе молибдена // Электрические контакты и электроды.* – Киев: Ин-т проблем материаловедения НАН Украины, 1996. – С. 95–105.
29. *Slade P.E. Arc erosion of tungsten based contact materials. A. review // Int. J. of Refractory and Hard Metals.* – 1986. – 5, № 4. – P. 208–214.
30. *Двойные и многокомпонентные системы на основе меди* / Под ред. М.Е. Дриц, Н.П. Бочвар, Л.С. Гузей и др. – М.: Наука, 1979. – 248 с.
31. *Mackey T., Ziolkowski I. Sybsolias phase diagram of Cu<sub>2</sub>O–CuO–MoO system // J. Solid Stat. Chem.* – 1980. – № 31. – P. 135–143.
32. *Mackey T., Ziolkowski I. Phase relation in the cupric molibdates – cuprous molibdates system // Ibid* – P. 145–151.

33. *Гречанюк И.Н.* Структура, свойства и электронно-лучевая технология получения композиционных материалов Cu–Zr–Y–Mo для электрических контактов: Дис. ... канд. техн. наук. – Киев: ИПМ им. И.Н. Францевича НАН Украины, 2007. – С. 171.
34. *Чорновол В.О.* Структура і корозійна стійкість композиційних матеріалів Cu–Mo, Cu–W, отриманих методом електронно-променевого випаровування-конденсації: Автореф. дис. .... канд. техн. наук. – Киев: ИПМ им. И.Н. Францевича НАН Украины, 2011. – 22 с.
35. *Артох А.Ю.* Розробка матеріалів для електричних контактів на основі міді й молибдену, легованих Al, Cr, Zn, отриманих методом електронно-променевого випаровування – конденсації: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев: ИПМ им. И.Н. Францевича НАН Украины, 2011. – С. 20.
36. *Гречанюк В.Г.* Фізико-хімічні основи формування конденсованих з парової фази композиційних матеріалів на основі міді: Автореф. дис. .... канд. техн. наук. – Киев: ИПМ им. И.Н. Францевича НАН Украины, 2013. – С. 40.
37. *Композиционные материалы на основе меди и молибдена для электрических контактов, конденсированные из паровой фазы. Структура, свойства, технология. Ч. 2. Основы электронно-лучевой технологии получения материалов для электрических контактов / Н.И. Гречанюк, В.А. Осокин, И.Н. Гречанюк и др. // Современ. электротехнология. – 2006. – № 2. – С. 9–19.*
38. *ТУУ 20113410.001–98.* Матеріали дисперсно-упрочнені для електричних контактів. – Введ. 02.06.98.
39. *ТУ У24.4-33966101-001:2014.* Матеріали дисперсно-зміцнені для електричних контактів. – Введ. 17.11.14.
40. *Пат. 34875 Україна.* Композиційний матеріал для електричних контактів та спосіб його отримання / М.І. Гречанюк, В.О. Осокін, І.Б. Афанасьєв, І.М. Гречанюк. – Опубл. 16.12.2002 р.
41. *Пат. 74155 Україна.* Спосіб отримання мікрошаруватих термостабільних матеріалів / М.І. Гречанюк. – Опубл. 15.11.2005 р.
42. *Пат. № 2271404 РФ.* Способ получения микрослойных термостабильных материалов / Н.И. Гречанюк. – Опубл. 03.10.2006 г.
43. [www.weldinglivetissues.com](http://www.weldinglivetissues.com)
44. *Пат. 104673 Україна.* Композиційний матеріал для електричних контактів та спосіб його отримання / М.І. Гречанюк, В.Г. Гречанюк, В.В. Бухановський. – Опубл. 25.02.2014 р.
45. *Performance of sliding contacts with Cu–Mo layers for transportation in mining industry / B. Miedzinski, Z. Okraszewski, N. Grechanyuk, S. Wandzio // Электрические контакты и электроды. – Киев: Ин-т проблем материаловедения НАН Украины, 2008. – С. 150–155.*
46. *Manufacturing Technique and Properties of Condensed Copper-Carbon Composite Materials for Sliding Electrical Contacts / N. Grechanyuk, R. Minakova, V. Bukhanovsky, N. Rudnitsky // Open Access Library J. – 2014. Vol.1. – P. 1–9.*
47. *Пат. 86434 Україна.* Композиційний матеріал для електричних контактів і електродів та спосіб його отримання / М.І. Гречанюк, І.М. Гречанюк, В.Г. Гречанюк. – Опубл. 27.04.2009 р.
48. *Взаємозв'язок між складом, структурою і механічними властивостями конденсованого композиційного матеріалу системи мідь–вольфрам / В.В. Бухановський, М.П. Рудницький, В.В. Харченко та ін. // Проблемы прочности. – 2011. – № 4. – С. 87–102.*
49. *Production technology, structure and properties of Cu–W layered composite condensed materials for electrical contacts / V.V. Bukhanovskyi, N.I. Grechanyuk, R.V. Minakova et. al. // Refractory Metals and Hard Materials. – 2001. – 29, Is. 5. – P. 573–581.*
50. *Структура і фізико-хімічні властивості композиційних матеріалів на основі міді і вольфраму, отриманих методом електронно-променевого випаровування / В.О. Денисенко, Р.В. Мінакова, В.Г. Гречанюк, І.М. Гречанюк // Наук. вісн. Чернівецького ун-ту. Хімія. – 2008. – Вип. № 422. – С. 26–33.*
51. *Performance of LV vacuum contactors with condensed composite multicomponent contacts / B. Miedzinski, Z. Okraszewski, M. Grechanyuk et. al. // Электрические контакты и электроды. – Киев: Ин-т проблем материаловедения НАН Украины, 2010. – С. 139–144.*
52. *Влияние технологических факторов на структуру, механические свойства и характер разрушения композиционного материала системы медь–хром / В.В. Бухановский, Н.И. Гречанюк, Н.П. Рудницкий и др. // Металловед. и терм. обработка металлов. – 2009. – № 8. – С. 26–31.*
53. *Пат. 32368А. Україна.* Контактный материал для дугогасительных камер и способ его получения // М.І. Гречанюк, М.М. Плащенко, В.О. Осокін та ін. – Опубл. 15.12.2000 р.
54. *Пат. 76737 Україна.* Контактна система вакуумної дугогасної камери / М.І. Гречанюк, М.М. Плащенко, А.В. Зварич, В.О. Осокін. – Опубл. 15.09.2006 р.
55. *Гречанюк В.Г.* Корозійностійкі композиційні матеріали на основі міді й електронно-променево обладнання для їх створення // Наук. вісн. Чернівецького ун-ту. – 2013. – № 640. – С. 43–51.
56. *ДСТУ ГОСТ 15.005:2009.* Создание изделий единичного и мелкосерийного производств, собираемых на месте эксплуатации. – Введ. 02.01.09.
57. *ТУ У 31.20113410-003–2002.* Контакти електричні на основі дисперсно-зміцнених матеріалів (МДК). – Введ. 30.10.02.

Поступила в редакцию 21.07.2015

## МЕТАЛЛ. ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТ-2016 VI специализированная выставка

23–25 марта 2016

г. Львов, Дворец спорта «Украина»

На выставке будут представлены современные технологии, способствующие переоснащению машиностроительной промышленности Украины.

Участники выставки «Металл. Оборудование. Инструмент-2016» смогут расширить торгово-экономические связи и наладить важные партнерские отношения.

Выставка имеет цель ознакомить с современным оборудованием для производства и обработки металла, в частности, оборудованием для восстановления и защиты металлических поверхностей; технологиями соединения, защиты и другими технологиями машиностроения.