

# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНЫХ И СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ И МОЛИБДЕНА

Н.И. Гречанюк<sup>1</sup>, В.Г. Гречанюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины.

03142, г. Киев, ул. Кржижановского, 3. E-mail: dig@ipms.kiev.ua

<sup>2</sup>Киевский национальный университет строительства и архитектуры.

03037, г. Киев, Воздухофлотский просп. 31. E-mail: knuba@knuba.edu.ua

Проанализировано влияние технологических факторов (материала, уровня и форм шероховатости поверхности, на которую осуществляется конденсация; материала и толщины разделительного слоя; температуры подложки; глубины и динамики изменения вакуума; химического состава и скорости испарения исходных материалов; угла падения парового потока на поверхность конденсации) на изменение механических свойств конденсированных из паровой фазы композиционных материалов Cu–Mo с концентрацией молибдена от 0 до 46,5 мас. %. Библиогр. 9, табл. 2, рис. 3.

*Ключевые слова:* электронно-лучевое испарение-конденсация; псевдосплавы; медь; молибден; механические свойства

Конденсированные из паровой фазы композиционные материалы (ККМ) на основе меди и молибдена нашли широкое промышленное применение для изготовления электрических контактов и электродов [1]. В работе [2] подробно проанализированы структура и фазовый состав указанных композитов. В данной работе впервые обобщены результаты механических свойств конденсированных композиционных материалов Cu–Mo, полученных при температурах подложки  $700 \pm 30$  °C из стали марки Ст3 и концентрации молибдена от 0 до 46,7 мас. % по трем технологическим схемам:

на стационарной подложке размерами  $700 \times 400 \times 15$  мм с переменной по длине подложки концентрацией меди и молибдена (вариант 1);

на вращающейся со скоростью 36 об/мин подложке диаметром 800 мм и толщиной 25...30 мм (вариант 2);

на вращающейся с регулируемой скоростью от 1 до 15 об/мин подложке диаметром 500 мм и толщиной 25...30 мм с поочередным наложением друг на друга слоев меди и молибдена (вариант 3) [2].

Поверхность подложек, на которые осуществлялась конденсация парового потока, обрабатывали до получения шероховатости ( $R_a$ ) не ниже 0,63 по ГОСТ 2759–73. Перед формированием конденсатов на предварительно нагретую до  $700 \pm 30$  °C подложку осаждали разделительный слой из диоксида циркония или фторида кальция, обеспечивающий их легкое отделение от поверхности конденсации. Для испарения использовали слитки меди марки М1 ГОСТ 859–78 и молибдена марки МЧВП ТУ 48-19-247–87.

Испарение меди осуществляли через ванну-посредник на основе Zr и Y (навеска 70 г на поверхности слитка меди диаметром 100 мм, состоящая из 70 мас. % циркония и 30 мас. % иттрия). После завершения процесса формирования ККМ содержание компонентов в закристаллизованной ванне-посреднике составило, мас. %: Cu — основа, Zr — 22...26, Y — до 5 [3]. Указанный технологический прием позволил примерно в 2...3 раза увеличить скорость испарения меди и уменьшить в паровом потоке количество микрокапельной фазы. При этом скорость осаждения меди и молибдена на стационарной подложке (вариант 1) изменили от 8 до 60 и от 3 до 10 мкм/мин, а на вращающейся (варианты 2, 3) — от 3 до 20 и от 1 до 3,5 мкм/мин соответственно. Суммарное содержание циркония и иттрия в конденсированных материалах Cu–Mo не превышало 0,1 мас. %. Конденсированные композиционные материалы представляли собой листовые прямоугольные (сечением  $700 \times 400$  мм) и цилиндрические (диаметром 500 и 800 мм) заготовки толщиной от 0,8 до 5 мм. Определение механических свойств ККМ проводили на плоских образцах с длиной рабочего участка 15 мм на установке 1248 в соответствии с ДСТУ 9651–84 [4].

Основные технологические параметры, влияющие на механические характеристики ККМ, следующие:

- материал, уровень и форма шероховатости поверхности, на которую осуществляется конденсация;
- материал и толщина разделительного шара;
- температура подложки;
- глубина и динамика изменения вакуума в процессе формирования ККМ;
- химический состав и скорость испарения исходных материалов;

угол падения парового потока на поверхность конденсации.

Критериями выбора материала подложки служат: близость коэффициентов теплового линейного расширения соответствующего материала и сконденсированного вещества, отсутствие образования эвтектик на границе подложка-конденсат при осаждении испаряемых материалов, экономичность, простота обработки и др. Таким материалом при получении копозитов Cu–Mo является углеродистая сталь марки Ст3.

Влияние уровня и формы шероховатости поверхности конденсации на изменение структуры ККМ рассмотрено в работах [4, 5].

Поскольку паровой поток практически полностью повторяет профиль поверхности подложки, на которую осуществляется конденсация парового потока, то уровень и форма шероховатости оказывают значительное влияние на структуру и, как результат, на механические характеристики сконденсированных материалов. Наилучшим вариантом является получение полированной поверхности, что практически возможно, но экономически нецелесообразно из-за существенного удорожания материалов при их промышленном производстве. Многолетний опыт формирования указанных материалов показал, что оптимальной для обеспечения требуемых структуры, механических характеристик и экономичности является поверхность с показателем уровня шероховатости ( $R_z$ ) равным приблизительно 0,63 и волнистым профилем после обработки.

Увеличение уровня шероховатости, изменение ее формы до куполообразной, конусной или ребристой прямоугольной неизбежно приводит к образованию пористости, несплошностей в ККМ и, как результат, снижению механических характеристик.

Влияние материала и толщины разделительного слоя на механические характеристики ККМ до последнего времени не изучалось. При получении массивных конденсатов некоторых чистых металлов и металлических сплавов для лабораторных исследований в качестве материала разделительного слоя использовали диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия [6].

Применение  $ZrO_2$ – $Y_2O_3$  при промышленном производстве композитов на основе меди и молибдена оказалось неэффективным. Достаточно часто в процессе механического отделения конденсата от подложки одна часть разделительного слоя оставалась на подложке, другая на конденсате. Процесс удаления указанного слоя с подложки и конденсата достаточно трудоемкий, учитывая высокую твердость осажденной керамики. Использование других соединений в качестве раз-

делительного слоя показало, что наиболее приемлемым является фторид кальция ( $CaF_2$ ), который имеет высокую термодинамическую стабильность (стандартная энергия Гиббса — 1161,9 кДж/моль), относительно высокую температуру плавления (1400 °С), растворимость в воде [7] и является недорогим материалом.

Первые сведения о структуре и свойствах разделительного слоя с  $CaF_2$  на подложке из стали марки Ст3 и его влияние на структуру массивных конденсатов на основе меди и железа приведены в работе [8]. На поверхности ККМ авторы наблюдали зернистую структуру. Ее разнообразие, особенности дефектности границ, их связь с внутренней структурой конденсатов свидетельствуют об образовании на подложке из стали марки Ст3 между разделительным слоем и ККМ переходного технологического слоя, в составе которого присутствуют компоненты разделительного слоя и конденсата. При средней толщине разделительного слоя 10...15 мкм толщина технологического слоя колеблется от 20 до 50 мкм. Она в значительной мере определяется температурой подложки. Чем выше температура осаждения, тем толще технологический слой, формирующийся в приповерхностной области ККМ, контактирующей с разделительным слоем.

При нанесении разделительного слоя  $CaF_2$  большое значение имеет масштабный фактор. Чем больше геометрические размеры подложки, тем меньше критическая толщина  $CaF_2$ , в которой образуются трещины. Так, на подложках из стали марки Ст3 размерами 250×200×20 мм трещин в разделительном слое, при его толщине 40...50 мкм, не обнаружено. В то же время на аналогичных подложках диаметром 80...1000 мм толщина разделительного слоя не должна быть больше 20 мкм. В случае превышения критической толщины в разделительном слое образуются трещины, которые трансформируются в технологический шар, а затем и в конденсированный материал. Их глубина в ККМ может достигать 70...100 мкм, что в конечном итоге приводит к снижению механических характеристик осажденных композитов. Образование трещин в разделительном слое обусловлено возникновением критических напряжений вследствие разности КТЛР фторида кальция и железа, которые усиливаются при больших габаритах подложки.

На рис. 1 приведены зависимости предела прочности ( $\sigma_b$ ) и относительного удлинения ( $\delta$ ) конденсированных микрослойных материалов (Cu–Zr–Y)–Mo, полученных по технологической схеме (вариант 2) [1], на подложках из стали марки Ст3 с разным уровнем шероховатости поверхности, на

которую осуществляется конденсация. Для получения указанных материалов подложку разрезали на сектора, поверхность которых обрабатывали до получения необходимого класса шероховатости (КШ). Подобный технологический прием позволил получить за один цикл ККМ с заданной концентрацией Мо на подложках с разным уровнем шероховатости. Анализ приведенных на рис. 1 зависимостей показывает, что, чем выше качество обработки поверхности, тем больше прочность и пластичность ККМ. Наиболее существенные различия по уровню механических свойств в ККМ наблюдаются в конденсатах с относительно высоким (8...14 %) содержанием молибдена.

Например, предел прочности и относительное удлинение (кривые 1, 4) конденсированных материалов, осажденных на секторе подложки, обработанном торцевой фрезой, составляют соответственно 855 МПа и 4,8 %. В то же время, значения прочности и пластичности для конденсатов, сформированных на подложке после электрохимической полировки, достигают 1220 МПа и 8,3 %. Указанные различия обусловлены, прежде всего, особенностями роста кристаллов на поверхности подложек с разной шероховатостью преимущественно с образованием дефектов на межкристаллитных границах.

В ККМ с содержанием Мо больше 14 мас. %, осажденных при  $T_n = 700 \pm 50$  °С, наблюдается резкое снижение прочностных характеристик вследствие образования пористости.

Качественно подобные зависимости изменения механических свойств получены в указанных материалах после вакуумного отжига образцов при температуре 900 °С в течение трех часов. При этом отмечается некоторое снижение характеристик прочности на 8...10 % и повышение пластичности на 10...25 % с увеличением среднеквадратического отклонения (3,3...5,0 %) значений этих параметров в сравнении с исходным состоянием материалов.

Повышение температуры подложки до  $900 \pm 30$  °С позволило получить ККМ Cu–Mo с содержанием тугоплавкой фазы до 45 мас. %.

На рис. 2 представлены зависимости предела прочности ( $\sigma_B$ ), предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) и относительного удлинения ( $\delta$ ) ККМ Cu–Mo от содержания молибдена, полученные на подложке с  $R_e$  примерно 0,63.

По механическим характеристикам указанные материалы уступают аналогичным композициям, осажденным при  $T_n = 700 \pm 30$  °С примерно в 1,5 раза. Это обусловлено образованием более крупнозернистой структуры в конденсатах, сформированных при повышенных температурах конденсации [1].

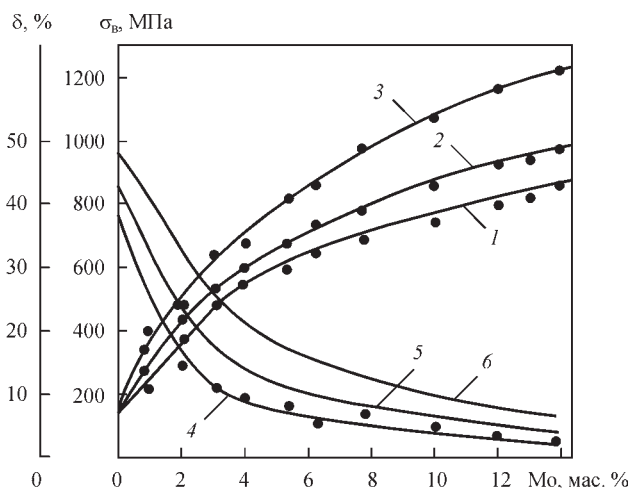


Рис. 1. Зависимости предела прочности (кривые 1–3) и относительного удлинения (4–6) ККМ Cu–Mo от уровня шероховатости подложки (ГОСТ 2789–73), на которую осуществляли конденсацию парового потока: 1, 4 — фрезирование торцевой фрезой тонкое,  $R_e = 1,6...0,63$ , КШ — 6...8; 2, 5 — шлифовка тонкая,  $R_e = 0,63...0,16$ , КШ — 8...10; 3, 6 — полировка электрохимическая,  $R_e = 0,04...0,01$ , КШ — 12...14

Механические свойства ККМ микрослойного типа, полученные при  $T_n = 700 \pm 30$  °С с поочередным наложением слоев меди и молибдена, исследовали на растяжение вдоль составляющих композиции слоев. Характерной особенностью изученных микрослойных конденсатов является сильная зависимость прочностных характеристик от толщины слоев. В табл. 1 представлены значения пределов прочности, текучести и относительного удлинения микрослойных конденсатов в исходном состоянии. Для сравнения приведены механические свойства литой меди М1 и молибдена, отожженного после дуговой вакуумной плавки [9].

Варьируя толщины чередующихся слоев, матричного и упрочняющего (высокомодульного), можно в широких пределах регулировать механические свойства микрослойных материалов. Для композиций с постоянной толщиной слоя меди (5,0...6,0 мкм) изменение толщины слоев молиб-

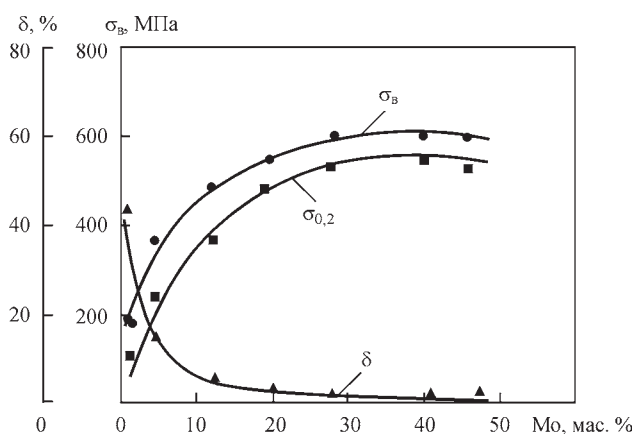


Рис. 2. Зависимости  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$  ККМ Cu–Mo, полученные при  $T_n = 900 \pm 30$  °С, КШ подложки примерно 0,63

**Таблица 1.** Механические свойства микрослойных материалов Cu–Mo при комнатной температуре (20 °С)

Толщина слоев, мкм		$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Cu	Mo			
5,0...6,0	1,0...1,3	280	160	29
->-	2,5	351	332	9
->-	3,0	403	360	8
->-	4,0	471	427	3
1,8	1,0...1,3	673	605	1
5,0	->-	280	160	29
7,0	->-	229	73	46
5,0	1,7...2,5	351	332	9
7,0	->-	284	247	15
10,0	->-	198	142	17
Cu(M1)	-	230	100	50
Mo	(ДВП)	539	323	15

дена от 1,0 до 4,0 мкм приводит к повышению предела текучести в 2,7 раза от 160 до 427 МПа, предела прочности в 1,7 раза от 280 до 471 МПа. Относительное удлинение при растяжении снижается от 29 до 3 % по мере увеличения толщины слоев молибдена.

Во второй партии исследуемых материалов выдерживали постоянной толщину микрослоев молибдена (1,0...1,3 мкм), меняя при этом толщину микрослоев меди. Увеличение толщины микрослоев меди приводит к снижению  $\sigma_b$  и  $\sigma_{0,2}$  и увеличению  $\delta$ . При получении слоев меди, равных 7,0 мкм, микрослойные материалы по прочности и пластичности приближаются к аналогичным характеристикам меди. Максимальные значения механических свойств в микрослойных композициях наблюдаются при минимальных исследуемых толщинах меди и молибдена, соответственно равных 1,8 и 1,0...1,3 мкм, и составляют:  $\sigma_b = 673$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 605$  МПа,  $\delta = 1$  %. ККМ микрослойного типа в указанных интервалах толщин превышают значения предела текучести молибдена на 50 % и на 600 % — меди. Уменьшение толщины чередующихся микрослоев Cu и Mo до 0,5...0,9 мкм приводит к падению прочностных характеристик, резкому увеличению интервала разброса их значений вследствие распада (нарушения сплошности) чередующихся микрослоев при температуре осаждения  $700 \pm 30$  °С.

Важным свойством с точки зрения практического применения ККМ является стабильность прочностных характеристик при повышенных температурах. Стабильность микрослоев определяет температурный интервал работы подобных материалов. Поэтому исследуемые микрослойные материалы отжигали в вакууме в течение 5 и 25 ч.

Металлографические исследования конденсированных микрослойных материалов показали,

что во всех исследуемых композициях сплошность слоев не нарушена.

Отжиг при температуре 950 °С в течение 5 ч способствует образованию более равновесной структуры в чередующихся микрослоях. При этом наблюдается незначительное (3...5 %) повышение исходного предела прочности. При увеличении времени отжига до 25 ч прочность микрослойных композиций снижается на 10...14 % для материалов с толщинами чередующихся слоев меди 5,0 и 7,0 мкм и на 25...27 % в конденсатах с толщиной слоев меди 1,8 мкм, толщина слоев молибдена во всех композициях составляет 1,0...1,3 мкм.

Пластичность ККМ микрослойного типа в интервале больших толщин слоев меди приближается к пластичности чистой меди.

Как известно [3, 4], для производства композиционных материалов Cu–Mo используются технически чистые металлы. Химическая чистота исходных слитков составляет для меди 99,7...99,9 %, для молибдена — 99,5...99,7 %. Выбор указанных материалов обусловлен, прежде всего, уменьшением стоимости конечного продукта при максимальном сохранении его свойств и эксплуатационных характеристик. Основными примесями в меди являются, мас. %: никель до 0,2, свинец до 0,01, мышьяк до 0,01, сера до 0,01, а в молибдене — вольфрам до 0,2 и ниобий до 0,15.

С целью интенсификации процесса испарения меди осуществляется через ванну-посредник из циркония и иттрия [3, 4]. Особенностью испарения подобных сплавов в вакууме с одного источника есть фракционирование, обусловленное расхождением скоростей испарения компонентов, которые образуют сплав. Поэтому конденсаты, которые формируются на подложке, имеют неоднородный состав по толщине. Существенное расхождение упругости паров испаряемого сплава используется не только для увеличения скорости испарения одного из компонентов сплава, но и для контролирования легирования конденсата.

В нашем случае испарение технически чистой меди через ванну-посредник из циркония и иттрия приводит к получению меди с суммарным их содержанием до 0,1 мас. %. Подобное легирование способствует повышению коррозионной стойкости, пределов прочности и текучести при незначительном снижении электропроводности по сравнению с технически чистой медью.

При получении ККМ путем испарения исходных материалов из отдельных тиглей и конденсацией пара на стационарной подложке скорости испарения выбираются в зависимости от требуемого состава композита. Однако вследствие резкой зави-

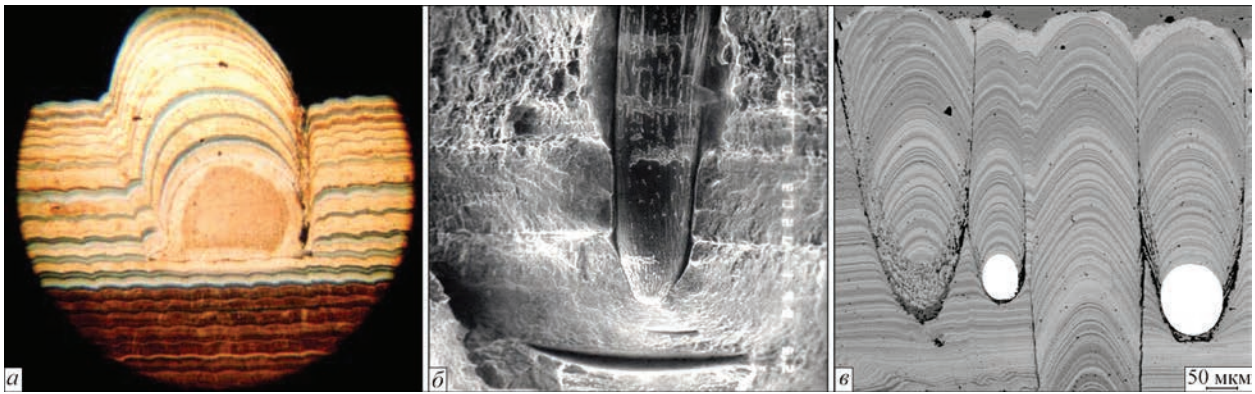


Рис. 3. Микроструктура стержней в конденсате: а, в — шлиф; б — излом

симости скорости испарения от температуры жидкой ванны получение конденсатов с однородным по толщине составом возможно только при полной стабилизации скорости испарения. Даже при колебании температуры жидкой ванны в пределах 10...20 °С скорость испарения может изменяться вдвое [1], что крайне неблагоприятно сказывается на повторяемости состава конденсата и, как следствие, его физико-механических характеристиках.

Нежелательный градиент концентраций в конденсированных материалах, применяемых для промышленного производства изделий, в значительной степени может быть устранен путем применения движущихся подложек. Метод движущихся подложек с раздельным испарением компонентов для получения псевдосплавов требуемого химического состава характеризуется высоким коэффициентом использования пара (в нашем случае до 80 %), а также в значительной мере подавляет столбчатую структуру, которая иногда приводит к растрескиванию конденсатов. Столбчатая структура не образуется, поскольку угол падения парового потока непрерывно меняется.

Скорость испарения оказывает существенное влияние на структуру и физико-механические свойства конденсатов. Чем выше скорость испарения, тем больше вероятность образования дефектов в конденсатах. В большинстве случаев образующиеся дефекты являются следствием переноса жидкой фазы в виде микрокапель. Подобные капли сферодиризируются. Сфероиды, удерживаясь на поверхности сконденсированного материала, вызывают нарушение фронта кристаллизации. Опухлость, которая возникает на закристаллизованных микрокаплях, наследуется всеми последующими порциями кристаллизующегося пара, вплоть до поверхности конденсата (рис. 3).

Химический состав микрокапель, на которых формируются иглоподобные стержни, неоднородный. Беспористые сфероидальные капли кроме основного компонента по результатам О-же анализа

содержат цирконий, углерод, кислород, азот. Пористые шлакоподобные закристаллизованные частицы, кроме перечисленных выше элементов, дополнительно содержат фтор, хлор, кальций. Поскольку выброс микрокапельной фазы носит хаотический характер, то образование стержней происходит (или не происходит) на любом этапе формирования конденсата. Их количество в объеме сконденсированного материала зависит от многих факторов, главными из которых являются: чистота исходных (испаряемых) материалов; удельная мощность, вкладываемая на единицу площади испаряемого вещества; плотность материала и др.

Границы стержней с основным материалом являются местом локализации пластической деформации и образования трещин. Поэтому была проведена сравнительная оценка изменения механических характеристик ККМ в зависимости от количества и размеров стержней, их расположения на поверхности изломов материала (табл. 2). Установлено, что наличие стержней в изломе сопровождается снижением прочности и пластичности тем интенсивнее, чем больше их длина, диаметр и количество в изломе. Следует отметить, что образование стержней на завершающей стадии получения ККМ в меньшей мере влияет на снижение их прочностных и пластических характеристик.

Нельзя не учитывать также тот факт, что при стандартном рабочем вакууме ( $3 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-3}$  Па) осаждения композитов в паровом облаке происхо-

Таблица 2. Влияние размеров стержней на механические характеристики ККМ Cu-10...12 % Мо

№ образца	Размер стержней		Механические свойства	
	Диаметр	Длина	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %
17	0,415	1,00	602	0,00
24	0,46	0,63	628	0,95
18'	0,54	1,06	575	0,00
20'	0,25	1,14	634	0,30
22'	Без стержней		666	2,60
30'	->-		686	2,10

дит частичное окисление меди и молибдена и, как результат, образование дополнительных упрочняющих фаз  $\text{CaO}$  и  $\text{MoO}_3$  (до 3 мас. %), которые сложным образом влияют на изменение физико-механических характеристик полученных материалов.

### Выводы

1. Определены механические характеристики ККМ  $\text{Cu-Mo}$ , полученных по трем технологическим схемам при температурах подложки  $700 \pm 30$  и  $900 \pm 30$  °С.

2. Установлено влияние подготовки поверхности подложки, на которую осуществляется осаждение парового потока, на изменение прочности и пластичности сконденсированных материалов.

3. Выявлено взаимодействие конденсата  $\text{Cu-Mo}$  с разделительным слоем  $\text{CaF}_2$  с образованием технологического слоя, который оказывает отрицательное влияние на механические характеристики.

4. Дефекты структуры в виде стержней, образующихся на микрокаплях, выброшенных из жидкой испаряемой ванны, приводят к снижению прочности и пластичности.

### Список литературы

- Гречанюк Н.И., Гречанюк В.Г., Хоменко Е.В. и др. (2016) Современные композиционные материалы для коммутационной и сварочной техники. Сообщение 2. Применение методов высокоскоростного испарения в вакууме для изготовления электрических контактов и электродов. *Автоматическая сварка*, **2**, 41–47.
- Гречанюк Н.И., Гречанюк В.Г. (2018) Конденсированные из паровой фазы дисперсные и слоистые объемные нанокристаллические материалы на основе меди и молибдена. Сообщение 1. Структура и фазовый состав. *Современная электрометаллургия*, **1**, 42–53.
- Гречанюк Н.И., Осокин В.А., Гречанюк И.Н. и др. (2006) Композиционные материалы на основе меди и молибдена для электрических контактов, конденсированных из паровой фазы. Структура, свойства. Технология. Часть 2. Основы электронно-лучевой технологии получения материалов для электрических контактов. *Там же*, **2**, 8–17.
- Гречанюк В.Г. (2013) *Фізико-механічні основи формування конденсованих з парової фази композиційних матеріалів на основі міді*: дис. ... д-ра хім. наук. Київ, ІПМ.
- Гречанюк І.М. (2007) *Структура, властивості і електронно-променева технологія отриманих композиційних матеріалів Cu–Mo–Zr–Y для електричних контактів*: дис. ... канд. техн. наук. Київ, ІПМ.

- Демчишин А.В. (1981) *Структура и свойства толстых вакуумных конденсатов металлических и неметаллических материалов и научные основы их получения*: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона.
- Рабинович В.А., Хавин З.Я. (1978) *Краткий химический справочник*. Химия, Ленинградское отделение.
- Мінакова Р.В., Гречанюк М.І., Затовський В.Г. та ін. (2010) Про деякі особливості структури і властивості товстих парових конденсатів на основі міді і заліза. *Електронна мікроскопія і прочність матеріалів*, **17**, 37–44.
- Осокин В.О. (1990). *Структура, свойства и электронно-лучевая технология получения композиционных материалов на основе меди*: дис. ... канд. техн. наук. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины.

### References

- Grechanyuk, N.I., Grechanyuk, V.G., Khomenko E.V. et al. (2016) Modern composite materials for switching and welding equipment. Information 2. Application of high-rate vacuum evaporation methods for manufacturing electric contacts and electrodes. *The Paton Welding J.*, **2**, 34–39.
- Grechanyuk, N.I., Grechanyuk, V.G. (2018) Dispersed and laminar volumetric nanocrystal materials on base of copper and molybdenum. Structure, properties, technology, application. Information 1. Structure and phase composition. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 42–53 [in Russian].
- Grechanyuk, N.I., Osokin, V.A., Grechanyuk, I.N. et al. (2006) Composite materials on base of copper and molybdenum, condensed from vapor phase, for electric contacts. Structure, properties, technology. Pt 2. Fundamentals of electron beam technology for producing materials for electric contacts. *Advances in Electrometallurgy*, **2**, 8–17.
- Grechanyuk, V.G. (2013) *Physical-mechanical principles of formation of composite materials on base of copper, condensed from vapor phase*: Syn. of Thesis for Dr. of Chem. Sci. Degree, Kyiv, IPM [in Ukrainian].
- Grechanyuk, I.M. (2007) *Structure, properties and electron beam technology of produced Cu–Mo–Zr–Y composite materials for electric contacts*: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree, Kyiv, IPM [in Ukrainian].
- Demchishin, A.V. (1981) *Structure and properties of thick vacuum condensates of metallic and nonmetallic materials and scientific principles of their production*: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree, Kiev, PWI [in Russian].
- Rabinovich, V.A., Khavin, Z.Ya. (1978) *Concise chemical reference book. Khimiya, Leningradskoe Otdelenie* [in Russian].
- Minakova, R.V., Grechanyuk, M.I., Zatoovsky, V.G. et al. (2010) About some peculiarities of structure and properties of thick vapor phase condensates based on copper and iron. *Elektronnaya Mikroskopiya i Prochnost Materialov*, **17**, 37–44 [in Ukrainian].
- Osokin, V.O. (1990) *Structure, properties and electron beam technology of producing composite materials on base of copper*: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree, Kiev, PWI [in Russian].

## МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДИСПЕРСНИХ І ШАРУВАТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ МІДІ ТА МОЛІБДЕНУ

Н.І. Гречанюк<sup>1</sup>, В.Г. Гречанюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.  
03142, м. Київ, вул. Кржижанівського, 3. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

<sup>2</sup>Київський національний університет будівництва та архітектури.  
03037, м. Київ, Повітрофлотський просп. 31. E-mail: knuba@knuba.edu.ua

Проаналізовано вплив технологічних факторів (матеріалу, рівня і форм шорсткості поверхні, на яку здійснюється конденсація; матеріалу і товщини розділового шару; температури підкладки; глибини і динаміки зміни вакууму; хімічного складу і швидкості випаровування вихідних матеріалів; кута падіння парового потоку на поверхню конденсації) на зміну механічних властивостей конденсованих з парової фази композиційних матеріалів Cu–Mo з концентрацією молібдену від 0 до 46,5 мас. %. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 3.

*Ключові слова: електронно-променеве випаровування-конденсація; псевдосплави; мідь; молібден; механічні властивості*

## MECHANICAL PROPERTIES OF DISPERSED AND LAMINAR COMPOSITE MATERIALS ON COPPER AND MOLYBDENUM BASE

N.I. Grechanyuk<sup>1</sup>, V.G. Grechanyuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>I.M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine.

3 Krzhizhanovsky Str., 03142, Kyiv, Ukraine, E-mail: dir@ipms.kiev.ua

<sup>2</sup>Kiev National University of Construction and Architecture.

31 Vozdukhoflotsky Ave., 03037, Kyiv. E-mail: knuba@knuba.edu.ua

The effect of technological factors (material, level and shape of surface roughness, on which the condensation is realized; material and thickness of a separating layer; substrate temperature; depths and dynamics of vacuum change; chemical composition and rate of evaporation of initial materials; angle of incidence of vapor flow on condensation surface) on change in mechanical properties of composite materials Cu–Mo with molybdenum concentration from 0 up to 46.5 wt.%, condensed from the vapor phase, was analyzed. Ref. 9, Tabl. 2, Fig. 3.

*Key words: electron beam evaporation; pseudo alloys; copper; molybdenum; mechanical properties*

Поступила в редакцію 11.04.2018



Образцы из титанового сплава, полученные по технологии xBeam 3D Metal Printer и изделие «Муха» — ручная аргодуговая сварка