

## Возможности электронно-лучевой технологии получения композиционных материалов

Н. И. Гречанюк

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича  
НАН Украины, Киев

*Рассмотрены возможности процессов высокоскоростного испарения и последующей конденсации в вакууме металлов и неметаллов по созданию новых композиционных материалов: дисперсно-упрочненных, микрослойных, пористых. Приведены примеры их использования в промышленности.*

**Ключевые слова:** электронно-лучевая технология, конденсированные из паровой фазы композиционные материалы.

Появление в середине XX столетия электронно-лучевой (1956 г.), плазменно-дуговой (1958 г.) и лазерной (1964 г.) технологий поставило перед разработчиками новых технологий обработки и сварки материалов вопрос: почему традиционный источник энергии для этих целей, свободно горящая сварочная электрическая дуга, осуществляет плавление металлов “поверхностно” (отношение глубины расплавленной зоны к ее ширине менее единицы), а новые источники, электронный луч, лазер плазма — “кинжально” (отношение глубины расплавленной зоны к ее ширине  $\leq 100$ ). Так появилось понятие концентрированных потоков энергии (КПЭ).

Оказалось, что если источник энергии развивает удельную мощность  $\geq 10^5$ — $10^6$  Вт / см<sup>2</sup> (что свойственно электронному лучу, лазеру плазме), то процесс нагрева вещества становится самоорганизующимся (синергетическим) и, соответственно, резко, то есть при наличии некоторого порога удельной мощности, изменяются закономерности переноса тепла в нагреваемом объекте. Преодоление этого порога открыло перед технологами существенно новые возможности:

- повышения производительности процессов сварки и обработки в сотни раз;
- повышения качества и надежности обрабатываемых изделий;
- получения новых эффектов в сварке, обработке и т. д.

Все это оказалось связано с фундаментальными открытиями в новой области физики — синергетике, науке о самоорганизации процессов в живой и неживой природе. Разработчиками новой области знаний (70-е годы XX ст.) являются лауреат Нобелевской премии Илья Пригожин, физики Г. Хакен, Г. Николис и др. [1].

Большой научный и технологический опыт работы с КПЭ показал, что наиболее эффективным источником энергии при обработке материалов считается электронный луч. Для обработки и сварки материалов используют электронные лучи мощностью 1 МВт и более (что не относится к лазерам и плазме). Электронный луч имеет максимальный коэффициент поглощения энергии. Обработку электронным лучом материалов проводят в вакууме, что уменьшает воздействие на нагреваемый материал типичных окислитель-

ных сред (воздух, разного рода газовые смеси и т. п.). Фактически электронный луч — в некоторой мере “идеальный” источник энергии для обработки материалов. Если его “ухудшать”, например, уменьшая коэффициент поглощения энергии, то возникают проблемы, характерные для воздействия на вещество луча лазера. Если вакуум заменить на атмосферу инертного газа либо слабо- ( $\text{CO}_2$ ) или сильноокислительную (воздух) среды, то получим аналог газового разряда (электрическая дуга).

Сущность процесса электронно-лучевого воздействия состоит в том, что кинетическая энергия сформированного в вакууме тем или иным способом электронного пучка (импульсного или непрерывного) превращается в тепловую в зоне обработки. Поскольку диапазоны мощности и концентрации энергии в луче велики, возможны все виды термического воздействия на материалы: нагрев до заданных температур, плавление и испарение с очень высокими скоростями.

По-видимому, история процесса электронно-лучевого воздействия начинается с 1852 г., когда У. Гроув в докладе, прочитанном в Королевском обществе, впервые указал на возможность электронно-лучевого нагрева. Первая электронно-лучевая плавка платинового анода в катодно-лучевой трубке продемонстрирована в 1879 г. В то время ещё не было известно, что катодные лучи представляют собой потоки электронов. В 1907 г. выдан первый патент на процесс электронно-лучевой плавки металлов.

О практическом применении электронных лучей для сварки впервые сообщил К. Х. Штейгервальд в 1950 г. О своих исследованиях электронно-лучевой сварки Франция, Германия, США и СССР заявили в 1957—1958 гг.

Устройство для электронно-лучевой обработки материалов (сверления, фрезерования) создано в 1938 г. Практическое применение идеи удаления материала с помощью электронного луча рассматривалось К. Х. Штейгервальдом в 1953 г., а установки для фрезерования были использованы в 1959 г.

В настоящее время ни одна отрасль промышленности, связанная с получением, соединением и обработкой материалов, не обходится без электронно-лучевого нагрева. Это объясняется характерными преимуществами данного метода, главные из которых — возможность концентрации энергии от  $10^3$  до  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, то есть во всем диапазоне термического воздействия, ведение процесса в вакууме, что обеспечивает чистоту обрабатываемого материала и полную автоматизацию процесса.

Развитие электронно-лучевой технологии идет в трех основных направлениях:

плавка и испарение в вакууме для нанесения пленок и покрытий; используют мощные (до 1 МВт и более) электронно-лучевые установки при ускоряющем напряжении 20—30 кВ; концентрация мощности невелика (не более  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>);

сварка металлов; создано оборудование трех классов: низко-, средне- и высоковольтное, охватывающее диапазон ускоряющих напряжений 20—150 кВ; мощность установок составляет 1—120 кВт и более при максимальной концентрации  $10^5$ — $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>;

прецизионная обработка материалов (сверление, фрезерование, резка); используют высоковольтные установки (80—150 кВ) небольшой мощности (не более 1 кВт), обеспечивающие удельную мощность до  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>.

**Т а б л и ц а 1. Типы и формы материалов, которые могут быть получены с помощью электронно-лучевого испарения**

Нанокристаллические				
Кристаллические				
Однофазные		Многофазные (композиционные)		
Чистые металлы, оксиды, бориды, сульфиды и др.	Твердые растворы	Дисперсно-упрочненные	Много-слойные	Пористые
Формы получения материалов				
Тонкие покрытия ( $(1-5) \cdot 10^{-2}$ мм)	Толстые покрытия ( $5 \cdot 10^{-2}-10$ мм)	Фольга, лента, лист	Порошки	

Одновременно совершенствуется электронно-лучевое оборудование и разрабатывается аппаратура для наблюдения, контроля и регулирования процесса электронно-лучевого воздействия [2—6].

В настоящее время значительный научный и практический интерес вызывает применение процессов высокоскоростного электронно-лучевого испарения и последующей конденсации в вакууме металлов и неметаллов для получения новых композиционных материалов. В табл. 1 приведены типы материалов, которые могут быть получены с помощью электронно-лучевого испарения, и формы их использования в промышленности. С определенной мерой условности рассматриваемые типы материалов можно разделить на два крупных класса: нанокристаллические и кристаллические.

**Нанокристаллические материалы.** Под нанокристаллическими (наноструктурными, нанофазными, нанокомпозитными) материалами (НМ) принято понимать такие материалы, у которых размер отдельных кристаллитов или фаз, составляющих их структурную основу, не превышает 100 нм хотя бы в одном измерении. Широкий интерес к НМ был возбужден в середине восьмидесятых годов работами Глейтера и сотрудников, впервые обративших внимание на повышение роли поверхностей раздела и особенно приграничных областей с уменьшением величины зерна и предложивших метод получения НМ [7—9].

Одним из широко применяемых методов получения НМ является физическое осаждение из паровой фазы (PVD). В табл. 2 [10] приведены основные типы поверхностных наноструктур, полученных на подложках. Рассматривая эти системы, прежде всего их необходимо делить на одно- и многослойные. Анализируя структуру поверхностных слоев, следует иметь в виду, что они могут быть отнесены к наноразмерным по двум признакам: толщине и среднему размеру зерна (или других структурных элементов, из которых состоит слой). В границах каждого слоя структура может быть однородной или неоднородной, слои могут быть сплошными или несплошными.

Многослойные структуры имеют те же разновидности, что и одно-слойные. В частности, они могут быть как дискретными, так и градиентными, сплошными и пористыми, некогерентными и эпитаксиальными.

**Т а б л и ц а 2. Основные типы поверхностных наноструктур на подложках**

Наноструктура	Характеристика слоев	Однородность границы раздела, градиентность
Однослойная	Сплошные Пористые Островковые	Дискретно-однородные Градиентные Некогерентные Когерентные (эпитаксиальные)
Многослойная	Сплошные  Пористые	Дискретно-однородные Дискретно-градиентные Некогерентные Когерентные непериодические Когерентные периодические

Во второй половине XX века такие тонкопленочные структуры трансформировали электронику в микроэлектронику и позволили создать миниатюрные устройства с удельными характеристиками, которые еще в недалеком прошлом казались фантастическими. А сегодня в нанoeлектронике используются устройства с размерами менее 100 нм.

Одновременно с изучением и практическим применением тонких пленок, полученных методом PVD, большой научный и практический интерес представляет исследование структур с большим количеством слоев, общая толщина которых составляет 10—100 мкм и более, то есть массивных макроскопических однородных, которые имеют внутреннюю наноструктуру. В этой группе наноструктурных систем необходимо различать одно- и гетерофазные. Однофазные наноструктуры имеют фактически один критический линейный параметр — средний размер зерен или кристаллита. Многофазные намного разнообразнее. Так называемые статистические системы состоят из одинаковых по геометрии структурных элементов, которые отличаются химическим составом и кристаллической структурой. К статистическим гетерофазным структурам следует отнести и нанопористые, хотя они при этом могут быть однофазными по химическому составу, так как поры рассматриваются как отдельная фаза [9].

Первые системные исследования подобных многослойных систем на основе меди и молибдена с толщиной чередующихся слоев, соответственно равной 400 и 100 нм, и общей толщиной до 4 мкм изложены в работах [11, 12]. Авторами установлено резкое увеличение прочности, коррозионной стойкости многослойных материалов Cu—Mo. В настоящее время указанные материалы изготавливаются в промышленном масштабе и используются для получения электрических контактов [13—15]. Продолжаются исследования других наноструктурных многослойных композиций Cu—Cr, Cu—W [16—18].

**Кристаллические материалы.** Более подробно изучен второй класс конденсированных материалов — толстые кристаллические пленки. Из разнообразия возможных вариантов конденсированных материалов наиболее полно исследованы однофазные толстые конденсаты на основе

чистых металлов, оксидов, карбидов, боридов. В обобщающих работах [19, 20] подробно проанализированы структура и свойства толстых (0,01—2 мм) конденсатов титана, никеля, меди, родия, железа, вольфрама, диоксида циркония, оксидов алюминия и иттрия, карбидов титана и циркония, диборидов титана, циркония. Изучены также конденсаты некоторых бинарных металлических и оксидных систем: Ni—Cu, Ni—B, Cr—Cu, Fe—Cu, Cu—Cr, Fe—Ni, Fe—Cr, ZrO<sub>2</sub>—Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>—CaO. Физико-механические свойства перечисленных композиций сопоставимы с аналогичными характеристиками материалов, полученных традиционными металлургическими методами.

К новым материалам, получаемым конденсацией, прежде всего, следует отнести композиционные дисперсно-упрочненные, слоистые и пористые материалы.

Дисперсно-упрочненные конденсаты состоят из поликристаллической металлической или керамической матрицы с равномерно распределенными в объеме дисперсными частицами второй фазы. Варьируя температуру подложки, скорость осаждения, можно в широких пределах изменять средние размеры кристаллитов матрицы от нескольких сотен микрон до нескольких сотен нанометров, размеры частиц упрочняющей фазы — от десятков нанометров до нескольких микрон. Активное влияние на морфологию, дисперсность и характер распределения упрочняющей фазы позволяет получить в дисперсно-упрочненных материалах сочетание свойств, недостижимое в обычных сплавах. Использование в качестве упрочняющих фаз стабильных тугоплавких соединений, например оксидов, не взаимодействующих активно с матричным металлом и не растворяющихся в нем вплоть до температуры его плавления, обеспечивает сохранение микрогетерогенного строения и дислокационной субструктуры до предплавления температур. Это позволяет сохранить длительную работоспособность материалов до  $(0,9—0,95)T_{пл}$ .

В большинстве случаев для получения дисперсно-упрочненных материалов используют методы порошковой металлургии. При этом компактные заготовки обычно формируют без масштабных ограничений [21]. К настоящему времени накоплен значительный опыт по упрочнению стабильными дисперсными частицами практически всех технически важных металлов и отдельных сплавов [22, 23]. Некоторые дисперсно-упрочненные материалы вышли за рамки лабораторных разработок. Их производят в промышленных масштабах и успешно применяют в конструкциях [21].

Определенные успехи достигнуты также при конструировании дисперсно-упрочненных материалов с помощью парофазной технологии. Демчишиным А. В. в работе [20] подробно исследованы структура и физико-механические свойства толстых вакуумных конденсатов систем: железо—карбид, железо—борид, железо—оксид, никель—диоксид циркония, вольфрам—диоксид циркония.

Автором статьи проведены детальные исследования наиболее важных в научном и практическом отношении дисперсно-упрочненных материалов на основе никеля (Ni—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiCr—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiCrY—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiCrAl—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiCr—Al—ZrO<sub>2</sub>), меди (Cu—Mo, Cu—NbC), хрома (Cr—Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr—Ce<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, CrLaFe—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CrLaFe—Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CrLaFe—Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [24].

Композиционные материалы NiCrAl—ZrO<sub>2</sub>, NiCrAl—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CrLaFe—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> применяются в новых типах теплозащитных покрытий на лопатках газовых турбин [25].

Одним из наиболее перспективных применений электронно-лучевой технологии является создание многослойных (микрослойных) композиционных материалов. Техника испарения и конденсации в вакууме открывает практически неограниченные возможности для получения многослойных материалов с любым чередованием слоев: металл—металл, металл—оксид, металл—карбид и т. п. [26]. Толстые вакуумные конденсаты, состоящие из большого числа чередующихся разнородных микрослоев, являются некоторой разновидностью слоистых композиционных материалов с регулируемыми в широких пределах структурой и физико-химическими свойствами. Микрослойные конденсаты (МСК), как правило, представляют собой поликристаллические агрегаты, в которых средний размер зерна  $D_3$  в каждом слое пропорционален толщине слоя  $\delta$ . В большинстве случаев  $D_3 \leq \delta$ . Это основное отличие микрослойных от макрослойных (слоистых) материалов, получаемых традиционными методами обработки [27]. Поэтому в микрослойных конденсатах, изменяя толщину слоя, можно в широких пределах регулировать размер зерна и, следовательно, структурно-чувствительные механические свойства.

Техника испарения и конденсации позволяет реализовать два характерных подхода к формированию структуры микрослойных конденсатов.

1. Осуществлять конденсацию при относительно низких температурах и, как следствие, получать конденсаты с большой плотностью несовершенств кристаллической решетки в пределах каждого слоя.

2. Производить микрослойные конденсаты с достаточно равновесной структурой осаждением при температурах выше  $(0,4—0,5)T_{пл}$  наиболее тугоплавкого слоя.

Некоторые закономерности изменения структуры и свойств микрослойных конденсатов, полученных по первому варианту, изложены в работах Л. С. Палатника и его учеников и обобщены в [23—29]. В то же время структура и физико-механические характеристики МСК, изготовленных с использованием второго подхода, до последнего времени не были практически изучены. Следует подчеркнуть, что уже первые эксперименты с микрослойными конденсатами продемонстрировали возможность достижения высокой прочности.

Накопленные к настоящему времени результаты исследований микрослойных конденсатов подтверждают возможность регулируемого изменения структуры и свойств этих материалов [27, 30, 31]. Можно ожидать, что микрослойные конденсаты с оптимальным сочетанием разнородных слоев по уровню физико-механических характеристик превзойдут соответствующие типы волокнистых композиционных материалов и эвтектических сплавов.

Области возможного практического применения микрослойных конденсированных материалов исключительно широки. В первую очередь, это покрытия специального назначения, например теплозащитные покрытия на лопатках газотурбинных двигателей. Как конструкционные материалы они могут быть использованы для создания так называемых оболочковых изделий (лопаток

газотурбинных двигателей (ГТД) улучшенной конструкции, лазерных зеркал большой мощности, дисков ГТД и т. п.)

Электронно-лучевая технология может быть успешно использована для получения специальных пористых материалов. Пористые проницаемые материалы широко применяются в качестве фильтров для механической очистки, подогрева жидкостей и газов, избирательной фильтрации, разделения и обогащения газов, аэрации жидкостей и порошкообразных материалов, проведения реакций в кипящем слое, дозирования и равномерного распределения жидкости или газа, охлаждения высокотемпературных конструкций, а также в качестве увлажнителей, звукоизоляторов и т. п.

Наиболее распространенными при изготовлении пористых материалов являются методы порошковой металлургии, позволяющие получать заготовки с общей пористостью до 90% и размерами пор до 300 мкм [32, 33].

Создание пористых материалов с программируемой пористостью, но с меньшими размерами пор, наталкивается на ряд непреодолимых технологических трудностей, связанных со спецификой их изготовления [33]. В то же время необходимость в подобных материалах высока; например, они с успехом могли бы быть использованы для опреснения морской воды, фракционирования пищевых продуктов, в частности молока, получения специальных ультратонких фильтров, для очистки ракетного топлива катализаторов и т. п. В значительной степени данная проблема может быть решена путем создания с помощью парофазной технологии двухфазных композиционных материалов с прецизионно регулируемым объемом и размерами пор.

Проведенные в последние годы системные исследования одно- и гетерофазных материалов подтвердили возможности получения конденсированных из паровой фазы пористых материалов с регулируемым размером (от 0,1 до 1,5 мкм) и объемом пор (от 0 до 40%) [24]. Подтверждена также возможность использования пористых композиционных материалов в качестве катализаторов в двигателях внутреннего сгорания [34].

Достаточно широкие, однако не до конца исследованные перспективы использования конденсированных материалов связаны с технологией изготовления, вариацией формы изделий, обусловленных областью их применения. Конденсаты никеля, меди, цинка, титана, хрома, нержавеющей стали используются для металлизации в вакууме стальной полосы.

Наиболее широкое практическое применение получили конденсаты на основе сплавов Fe(Ni, Co)CrAl, осаждаемых в виде покрытий толщиной  $5 \cdot 10^{-2}$ — $1,5 \cdot 10^{-1}$  мм на лопатки газовых турбин различного назначения.

Из композиционных конденсированных листовых материалов Cu—Mo, Cu—W, Cu—Cr изготавливаются электрические контакты; из композиции Cu—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — электроды для контактной точечной сварки [12—18].

Электронно-лучевая технология используется для изготовления фольги толщиной 25—200 мкм из меди, тантала, титановых сплавов [35, 36].

Продолжаются исследования получения конденсацией композиционных нанопорошков.

Исключительный интерес вызывает применение электронно-лучевой технологии нанесения толстых (0,3—10 мм) покрытий, являющихся одновременно несущими и коррозионно-стойкими, на лопатки ГТД, лазерные отражатели [24, 37].

Таким образом, представленные примеры использования процессов высокоскоростного испарения и последующей конденсации в вакууме металлов и неметаллов демонстрируют широкие возможности данной технологии по конструированию на атомном и молекулярном уровнях новых материалов и покрытий.

1. Зуев И. В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии. — М.: МЭИ, 1998. — 162 с.
2. *Pat. US 6, 923, 868 BZ.* Installation for electron — ray coatication of coatings / N. I. Grechanyuk. P. P. Kucherenko. — Publ. 02.08.2005.
3. *Пат. 2265078 РФ.* Установка для электронно-лучевого нанесения покрытий/ Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко. — Оpubл. 12.07.2005.
4. *Пат. № 40664 Украины.* Електронна гармата з лінійним термокатодом для електронно-променевого нагрівання / М. І. Гречанюк, П. П. Кучеренко, Є. Л. Піюк. — Оpubл. 14.07.2001.
5. *Denbnovetskiy S. V., Melnik V. G., Melnik I. V., Tygay B. A.* Application of glow discharge electron guns for plasma activated deposition of coatings // *Электротехника и электроника.* — 2006. — № 5—6. — С. 115—118.
6. *Золкин А. С.* Источники паров металлов для научных исследований и технологий. — Новосибирск: Ин-т теплофизики РАН, 1992. — 75 с.
7. *Андриевский Р. А., Глезер А. М.* Размерные эффекты в нанокристаллических материалах. Особенности структуры. Термодинамика, фазовые равновесия. Кинетические явления // *Физика металлов и металловедение.* — 1999. — **88**, № 1. — С. 50—73.
8. *Gleiter H.* Materials with ultrafine grain size // *Proc. Second Riso Internat. Symposium of Metallurgy and Materials Science.* — Roskilde: Denmark, 1981. — P. 15—21.
9. *Birringner R., Herr U., Gleiter H.* Nanocrystalline materials — a first report // *Suppl. Trans. Japan. Inst. Metals.* — 1986. — **27**. — P. 43—52.
10. *Скоруход В. В., Уварова И. В., Рагуля А. В.* Физико-химическая кинетика в наноструктурных системах. — К.: Академперіодика, 2001. — 179 с.
11. *Пат. 2271404 РФ.* Способ получения микрослойных термостабильных материалов / Н. И. Гречанюк. — Оpubл. 03.10.2006.
12. *Пат. 34875 Украины.* Композиционный материал для электрических контактов / Н. И. Гречанюк, В. А. Осокин, И. Б. Афанасьев // *БИ.* — 2001. — № 2.
13. *Grechanyuk N. I., Osokin V. A., Grechanyuk I. N., Minakova R. V.* Composite materials on base of copper and molybdenum, condensed from vapor phase, for electrical contacts. Structure, properties, technology. Part I. State of the art and prospects of application of tehnology of electron beam high-rate evaporation-condensation for producing materials of electric contacts // *Advances in Electrometallurgy.* — 2005. — No. 2. — P. 24—29.
14. *Grechanyuk N. I., Osokin V. A., Grechanyuk I. N. et al.* Composite materials on base of copper and molybdenum, condensed from vapor phase, for electrical contacts. Structure, properties, technology. Part 2. Fundamentals of electron beam technology for producing materials for electric contacts // *Ibid.* — 2006. — No. 2. — P. 17.
15. *Miedzinski B., Okraszewsky Z., Grechanyuk N. I., Wandzio J.* Performance of sliding contacts with Cu—Mo layers for transportation in mining industry // *Электрические контакты и электроды.* — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2008. — С. 150—155.
16. *Пат. 32368 А. Украины.* Контактный материал для дугогасительных камер и способ его получения / Н. И. Гречанюк, Н. Н. Плащенко, В. А. Осокин и др. // *БИ.* — 2000. — № 7—11.
17. *Пат. 76737 Украины.* Контактная система вакуумной дугогасительной камеры / Н. И. Гречанюк, Н. Н. Плащенко, А. В. Зварич, В. А. Осокин // *БИ.* — 2006. — № 9.
18. *Решение № а 200703343* о выдаче патента Украины от 19.11.2008. Композиционный материал для электрических контактов и электродов / Н. И. Гречанюк, И. Н. Гречанюк, В. А. Денисенко, В. Г. Гречанюк.
19. *Мовчан Б. А., Малащенко И. С.* Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. — К.: Наук. думка, 1983. — 230 с.

20. Демчишин А. В. Структура и свойства толстых вакуумных конденсатов металлических и неметаллических материалов и научные основы электронно-лучевой технологии их получения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — К., 1981. — 35 с.
21. Карпинос Д. М., Тучинский Л. И., Вишняков Л. Р. Новые композиционные материалы. — К.: Вища школа, 1977. — 309 с.
22. Портной К. И., Бабич Б. Н. Дисперсно-упрочненные материалы. — М.: Металлургия, 1974. — 199 с.
23. Трефилов В. И., Моисеев В. Ф. Дисперсные частицы в тугоплавких металлах. — К.: Наук. думка, 1978. — 237 с.
24. Гречанюк Н. И. Новые конструкционные материалы, получаемые путем конденсации паровой фазы в вакууме для изделий новой техники: дис. ... д-ра техн. наук. — К., 1988. — 520 с.
25. Пат. 42052 Украины. Защитное покрытие для лопаток газовых турбин / Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко, В. А. Осокин и др. // БИ. — 2001. — № 9.
26. Щербицкий В. В., Гречанюк Н. И., Кучеренко П. П. Электронно-лучевая установка для получения многослойных материалов // Проблемы спецэлектрометаллургии. — 1982. — Вып. 16. — С. 51—53.
27. Мовчан Б. А., Гречанюк Н. И. Структура и некоторые свойства микрослойных конденсированных материалов // Там же. — 1984. — Вып. 20. — С. 68—73.
28. Палатник Л. С., Ильинский А. И. Механические свойства металлических пленок // Успехи физ. наук. — 1968. — 65, № 4. — С. 613—643.
29. Ильинский А. И. Прочность и структура пленочных композиционных материалов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Харьков, 1982. — 440 с.
30. Bunshah R. F., Nimmagada R., Doer H. I., Grechanyuk N. I. Structure and property relationships in microlaminate Ni—Cu and Fe—Cu condensates // Thih Solid Films. — 1980. — 72, No. 2. — P. 261—275.
31. Bunshah R. F., Nimmagada R., Doer H. I., Grechanyuk N. I. Structure — property relationships in Cr—Cu and Ti—Ni microlacminate composites // Ibid. — 1984. — 52, No. 3. — P. 227—236.
32. Витрянюк В. К., Орденко В. Б. Классификация методов и технологии производства высокопористых металлокерамических материалов. Сообщение 1 // Порошковая металлургия. — 1967. — № 9. — С. 10—17.
33. Белов С. В. Пористые материалы в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1976. — 184 с.
34. Денисов А. А., Пятничко А. И., Ветров Б. Т. и др. Нейтрализация отходящих газов бензиновых ДВС на катализаторах, полученных осаждением в вакууме на металлических носителях // Проблемы специальной электрометаллургии. — 1996. — № 3. — С. 24—29.
35. Повышение качества поверхности и плакирование металлов / Под ред. А. Кнаушнера. — М.: Металлургия, 1984. — 367 с.
36. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. — М.: Энергия, 1980. — 528 с.
37. Гречанюк Н. И., Кучеренко П. П., Осокин В. А., Шпак П. А. Современное состояние и перспективы применения теплозащитных покрытий для газотурбинных установок и оборудования для их нанесения // Новости энергетики. — 2005. — № 2. — С. 38—43.

## Можливості електронно-променевої технології одержання композиційних матеріалів

М. І. Гречанюк

*Розглянуто можливості процесів високошвидкісного випаровування і послідувочої конденсації в вакуумі металів та неметалів по створенню нових композиційних матеріалів: дисперсно-зміцнених, мікрошарових, пористих. Наведено приклади їх використання в промисловості.*

**Ключові слова:** електронно-променева технологія, конденсовані з парової фази композиційні матеріали.

## Possibility of electron-beam technology obtaining of composite materials

N. I. Grechanyuk

*Among new materials obtained by evaporation and subsequent condensation in a vacuum, should include composite dispersion-hardened layered and porous materials. Dispersion-hardened condensates consist of a polycrystalline metal or ceramic matrix with uniformly distributed in the volume of dispersed particles of second phase. By varying the substrate temperature the deposition rate can change over a wide range average crystallite size from a few hundred microns to several hundred nanometers, the particles of strengthening phase from a few nanometers to several microns. Evaporation condensation technique allows to realize two typical approaches to the formation of structure microlayers condensates. 1. Produce condensation at relatively low temperatures and as a consequence of receiving condensates with a high density of crystal lattice within each layer. 2. Produce microlayers condensates with enough equilibrium structure at substrate temperatures of melting 0,4—0,5 least refractory layer. Electron-beam technology can be successfully used for porous materials. Examples of these composite materials are.*

**Keywords:** electron beam technology, condensed from the vapor phase composite materials.