

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИКРОЛАМИНАТОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ВАКУУМНОЙ ПРОКАТКОЙ

*И.М. Неклюдов, В.А. Белоус, В.Н. Воеводин, С.Ю. Диденко, Н.И. Ильченко,
Ю.С. Диденко, Ю.Н. Ильченко*
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

На основе результатов сравнительного анализа характеристик слоистых и волокнистых композитов обоснована концепция получения и применения нового типа композиционных материалов – металлических микроламинатов с двумерными армирующими элементами. Показана перспективность использования вакуумной прокатки в производстве многослойных композитов и микроламинатов.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Металлические микроламинаты (далее в тексте – МЛ) – это многослойные металлические композиты, в которых армирующим компонентом являются тонкие переходные зоны между слоями из двух и более различных металлов или сплавов, представляющих собой матрицу композита. [1]. В зависимости от типа диаграммы состояния контактирующих металлов, переходные зоны представляют собой сплошные слои твердорастворных фаз, интерметаллидных соединений и/или фаз внедрения (карбидов, нитридов и др.).

В связи с тем, что структура, состав и свойства переходных зон существенно отличаются от тех, которые характеризуют матричные металлы, эти зоны следует рассматривать как самостоятельную структурную составляющую МЛ. Таким образом, совокупность переходных зон играет ту же роль в МЛ, что и армирующие волокна в волокнистых композитах (далее – ВКМ), а металлы основных слоев – роль матрицы ВКМ.

От других видов слоистых композитов МЛ отличаются двумя особыми признаками. Первый – это большое количество слоев, измеряемое сотнями и тысячами в 1 мм толщины этого вида композитов, а второй – малая толщина переходных зон, лежащая в диапазоне $10^{-1} \dots 10^1$ мкм.

Эти признаки указывают на то, что в МЛ суммарная объемная доля переходных зон может составлять десятки процентов объема композита. Следовательно, вклад определенного свойства переходных зон в соответствующее свойство МЛ в целом может быть весьма существенным, что аналогично вкладу свойства волокон в характеристики ВКМ.

Интерес к МЛ, активизировавшийся в последние годы, связан с ростом требований практики к композиционным материалам, в том числе к изотропии их свойств. Имеется в виду то обстоятельство, что органическим недостатком ВКМ является высокий уровень анизотропии их свойств в направлениях вдоль и поперек укладки волокон. Этот недостаток порожден одномерным типом армирующих элементов и существенно ограничивает масштабы и области практического использования композитов этого класса.

Один из путей радикального снижения ани-

зотропии свойств композитов – это создание композитов с двумерными армирующими элементами в виде переходных зон. Этот тип армирующих элементов позволяет не только понизить уровень анизотропии механических свойств композитов, но и придавать им уникальные пространственно ориентированные свойства (электрические, тепловые, магнитные и др.), существенно различающиеся в направлениях, перпендикулярном и параллельном плоскости армирующих элементов. Поэтому вывод о важности и актуальности исследований в области материаловедения и технологии МЛ представляется вполне обоснованным.

Сведения о результатах таких исследований, имеющиеся на сегодняшний день, довольно фрагментарны и не дают возможности оценить перспективы практического использования МЛ [2, 3]. Это связано с тем, что подавляющее большинство технологий изготовления слоистых композитов, применяемых в настоящее время (сварка взрывом, сварка холодной прокаткой, диффузионная сварка, различные методы осаждения тонких металлических пленок из паровой фазы и др.), малоэффективны в получении многослойных структур, соответствующих сформулированным выше двум основным признакам МЛ. Имеется в виду или малое число слоев разнородных металлов в 1 мм толщины композитов, или малые размеры получаемых слоистых заготовок, малоприспособные для практического использования МЛ в качестве конструкционных материалов.

Реализуемая нами обширная и комплексная программа исследований в области применения метода горячей прокатки в вакууме (метода ГПВ) для изготовления МЛ различного состава нацелена не только на получение новых научных результатов в этой области, но и на поиск направлений наиболее эффективного практического применения этих МЛ.

Продолжая аналогию между МЛ и ВКМ, отметим, что общими для всех схем получения ВКМ являются два элемента. Первый – изготовление из готовых волокон и материала матрицы заготовки композита (препрега), второй – компактирование заготовки в единый монолит (рис. 1,а). Но применить эту схему к микроламинатам весьма затруднительно по следующим причинам. Сама по себе задача изготовления армирующих пластин микронной, а тем

более субмикронной толщины и площадью в сотни и тысячи квадратных сантиметров является очень сложной. Но еще большие трудности, связанные с выполнением технологических манипуляций с

очень тонкими пластинами значительной площади, возникают при изготовлении и компактировании заготовок для многослойных композитов с параметрами микроламинатов.

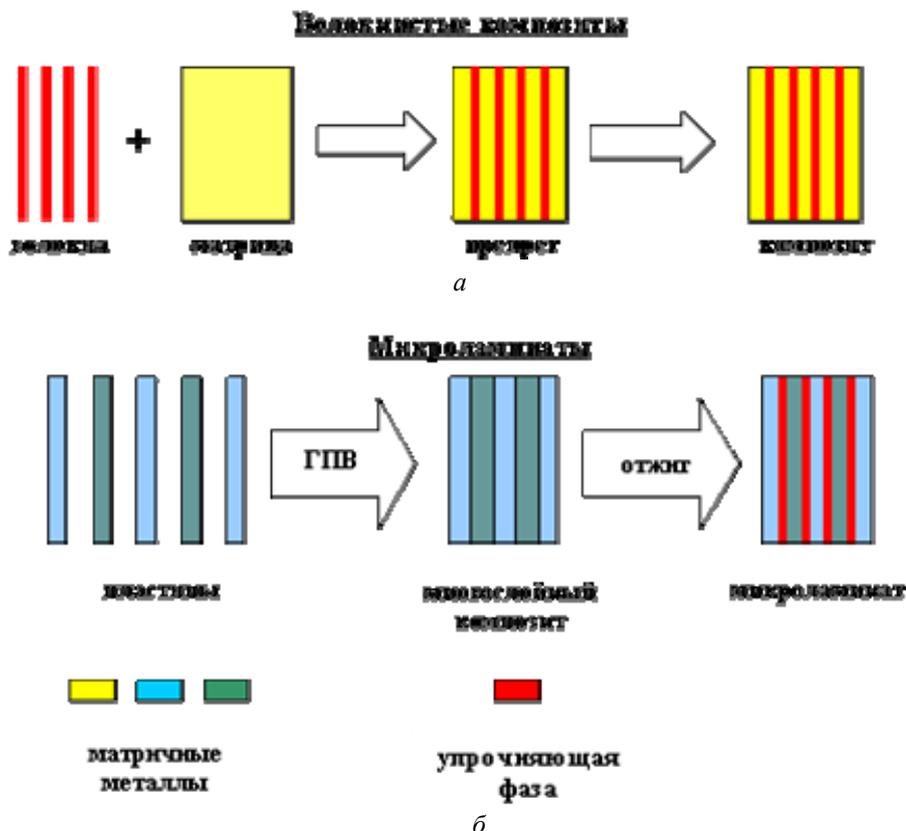


Рис. 1. Маршрутные схемы получения волокнистых композитов (а) и микроламинатов (б)

Нами предложен и развивается другой подход к проблеме получения МЛ (см. рис. 1,б). В отличие от препрегов для волокнистых композитов, мы используем заготовки, которые не содержат готовых армирующих элементов. Они представляют собой многослойные композиты (МСК), получаемые сваркой по методу ГПВ пакета из множества слоев металлов разного состава.

В процессе последующей термообработки МСК на заключительном этапе их трансформирования в МЛ на границах раздела слоев из матричных металлов разного состава образуются переходные зоны, которые являются продуктами диффузионно-контролируемого металлохимического взаимодействия контактирующих металлов.

Таким образом, по сравнению со схемой получения ВКМ принципиальным отличием предложенной нами схемы получения МЛ является синтез упрочняющей фазы из компонентов матрицы в процессе заключительной термообработки МСК. Этот подход аналогичен дисперсионному упрочнению металлов, достигаемому в результате выпадения новой фазы из пересыщенного твердого раствора в процессе термоактивируемого его старения. Отметим, что схема получения ВКМ аналогична дисперсионному упрочнению, которое осуществляется путем введения в расплав (или порошок) матричного металла готовых, т.е. заранее синтезированных, частиц упрочняющей фазы.

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТОВ ВАКУУМНОЙ ПРОКАТКОЙ

Анализ многолетней истории развития метода ГПВ убедительно свидетельствует о том, что этот вид твердофазной сварки позволяет получать высокопрочные сварные соединения практически любых пар разнородных металлов [4]. Первые МСК типа Ni-Cu-Ni, Cu-Mo-Cu и др. были получены в НИЦ ХФТИ еще в начале 60-х годов прошлого века [5, 6]. Эти композиты, нашедшие в свое время важное практическое применение, по существу были прототипом микроламинатов, а опыт, полученный в процессе их создания, послужил основой для разработки в последние годы методик получения МЛ на базе метода ГПВ.

Типичная схема изготовления биметалла или МСК по методу ГПВ предусматривает выполнение следующих операций. Из листов (плит, полос) металлов, входящих в состав композита, изготавливаются прямоугольные карточки-заготовки определенного размера, из которых в нужной последовательности собирают пакет-заготовку композита. Далее в прокатно-сварочной установке этот исходный пакет нагревают в вакууме до заданной температуры и прокатывают в плоских валках за один проход с требуемым обжатием. В процессе прокатки

между слоями пакета-заготовки устанавливается металлическая связь. После остывания композитную заготовку извлекают на атмосферу и осуществляют последующие операции с ней в соответствии с заданным регламентом.

Многолетний практический опыт изготовления различных биметаллов и МСК свидетельствует о том, что простой линейный маршрут (см. верхнюю половину рис. 2) пригоден для изготовления как толстых плит, так и тонких полос и лент из много-

слойных композитов, состоящих из небольшого числа слоев – как правило, не более 15...20. Для изготовления композитов с большим удельным числом слоев (количество слоев в 1 мм толщины композита) необходимо применять более сложный циклический маршрут (см. нижнюю половину рис. 2). Это связано с тем, что изготовить исходный пакет толщиной, например, 20 мм из нескольких сотен слоев практически невозможно.

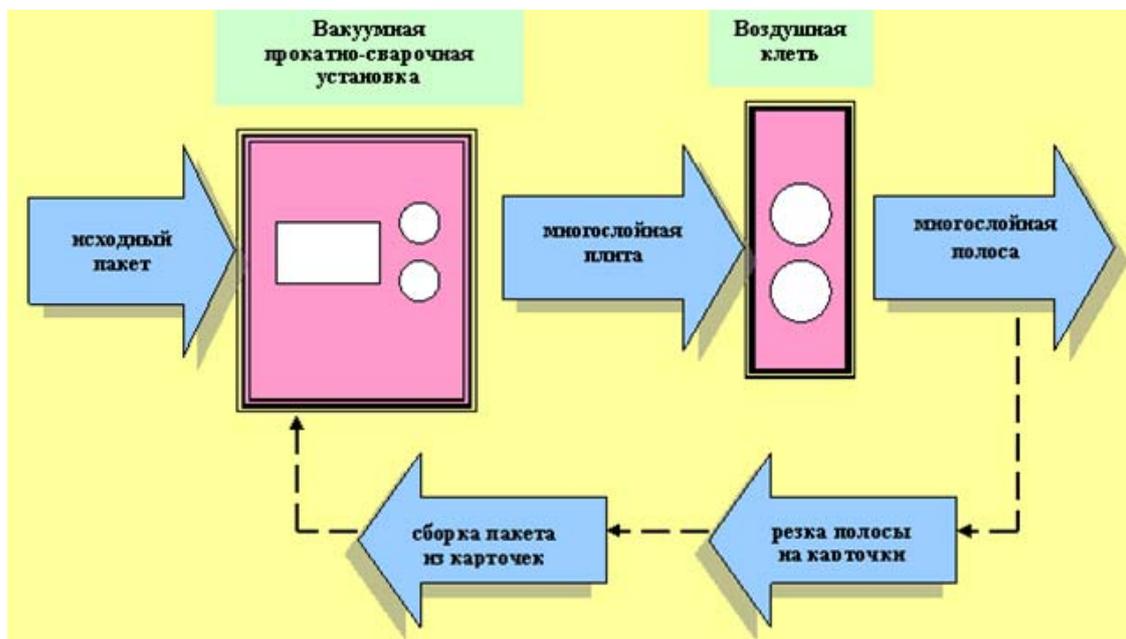


Рис. 2. Маршрутная схема получения слоистых композитов

Действительно, выполнение операций очистки от окислов и жировых загрязнений поверхностей такого большого числа фольг (толщиной порядка 10^{-1} мм и площадью порядка 10^4 мм²), последовательной укладки их в стопу и ее скрепления не только весьма трудоемко, но и не гарантирует полной и качественной очистки или предотвращения попадания загрязнений на свариваемые поверхности в процессе сборки пакета. Иными словами, обычный способ изготовления исходного пакета для получения композитов с большим удельным числом слоев неприемлем.

Избежать указанных трудностей можно путем применения циклического маршрута изготовления многослойных композитов. В этом случае исходный пакет имеет умеренное количество слоев (до 20), его изготовление предусматривает использование хорошо отработанных методик и поэтому не вызывает никаких затруднений. Далее следует сварка слоев исходного пакета по методу ГПВ, раскатка полученной многослойной плиты в полосу, резка полосы на несколько карточек, сборка пакета из этих карточек и сварка его по методу ГПВ. Понятно, что число слоев в конечной многослойной полосе, полученной в результате осуществления нескольких описанных циклов, может быть неограниченно большим.

Вместе с тем, для числа слоев все же существуют ограничения, обусловленные практической целесообразностью и учетом диффузионно-контролируе-

мых процессов, протекающих в композитах в процессе их изготовления. Первый тип ограничений связан с тем, что с увеличением числа циклов возрастает трудоемкость и энергозатратность изготовления композита, а также увеличивается количество неизбежных технологических отходов. С учетом этих обстоятельств и нашего практического опыта изготовления различных многослойных композитов мы пришли к выводу о том, что практически приемлемое удельное число слоев в композитах, получаемых по описанному циклическому маршруту, лежит в интервале $10^2...10^3$.

Второй тип ограничений связан со стремлением минимизировать толщину переходных зон, которые образуются между слоями композита в процессе многократных нагревов пакетов перед их сваркой вакуумной прокаткой и/или промежуточных отжигов композитной заготовки в процессе раскатки ее в полосу. Это особенно важно для случая включения в состав композита тех материалов, компоненты которых способны к реакционному взаимодействию с образованием интерметаллидов или фаз внедрения. Наличие достаточно толстых слоев этих хрупких фаз во многих случаях приводит к невозможности проведения раскатки композитной заготовки в полосу без расслоения заготовки, т.е. к невозможности изготовить многослойный композит с желаемым числом слоев.

Известные в настоящее время расчетные мето-

дики оценки допустимой толщины слоев хрупких фаз и кинетики ее роста не позволяют получить практически применимые результаты, так как все они базируются на определенных модельных, а потому упрощенных, представлениях о реальных процессах в многокомпонентных композитах. Кроме того, они игнорируют многие технологические факторы, которые существенно влияют на протекание процессов реакционного взаимодействия. Поэтому наиболее эффективным путем решения проблемы получения конкретного многослойного композита из реакционно-способных компонентов является экспериментальное определение допустимых значений температурно-временных параметров термического воздействия на этот композит в процессе его изготовления.

Таким образом, установить, с точки зрения ме-



а



б

Рис. 3. Внешний вид многослойных (а) и сложноструктурированных (б) композитов

Важным и интересным для практики результатом наших исследований является способ уменьшения бесполезной потери исходных металлов в описанном процессе изготовления многослойных композитов. Его суть состоит в компактировании вакуумной прокаткой стружки, обрезки и других видов неизбежных отходов производства в беспористые полосы и фольги с необычными рисунками на их поверхности, называемых нами «сложноструктурированными композитами» [7]. Этот вид слоистых композитов имеет хорошие перспективы применения его как в различных технических изделиях, так и в изделиях декоративно-прикладного искусства, бытовых изделиях и пр. (см. рис. 3,б). Понятно, что переработка отходов основного производства в сопутствующую товарную продукцию будет положительно влиять на рентабельность производства многослойных композитов с использованием метода ГПВ.

ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТОВ В ИЗДЕЛИЯ ИЗ МИКРОЛАМИНАТОВ

Схема получения МЛ с использованием вакуумной прокатки (см. рис. 1, б) отражает основные стадии изготовления любых типов МЛ как собственно конструкционных или функциональных материалов,

таллохимического взаимодействия компонентов композитов, какой-то интервал числа слоев, общий для композитов любого состава, не представляется возможным. Вместе с тем следует отметить, что путь уменьшения эффектов реакционного взаимодействия вполне очевиден – это минимизация длительности и интенсивности термического воздействия на композит в процессе его изготовления до практически приемлемых пределов.

В качестве иллюстрации дееспособности предложенной нами методики получения многослойных композитов с большим удельным числом слоев по описанному многоцикловому маршруту на рис. 3,а приведены фотографии внешнего вида и макрошлифов некоторых композитов, полученных к настоящему времени.

но не учитывает ряда важных аспектов их практического использования.

Как отмечено выше, ключевым и отличительным элементом нашего подхода к проблеме производства изделий из МЛ является то, что синтез упрочняющего компонента композита осуществляется в процессе термообработки заготовки этого изделия, сформированной из соответствующего МСК (рис. 4).

Необходимость применения этой маршрутной схемы обусловлена тем, что проведение большинства обычных технологических манипуляций с МЛ приведет к образованию локальных трещин в хрупких переходных зонах из интерметаллидов или фаз внедрения. Понятно, что наличие таких структурных микродефектов в материале изделия, с точки зрения его функциональной пригодности, является недопустимым. Поэтому не рассматриваем МЛ как конструкционные материалы для конечного изделия в традиционном смысле – таковыми являются только МСК, используемые для изготовления заготовки изделия.

В целом процесс производства изделий состоит из трех основных этапов:

- изготовление МСК с большим удельным числом слоев;

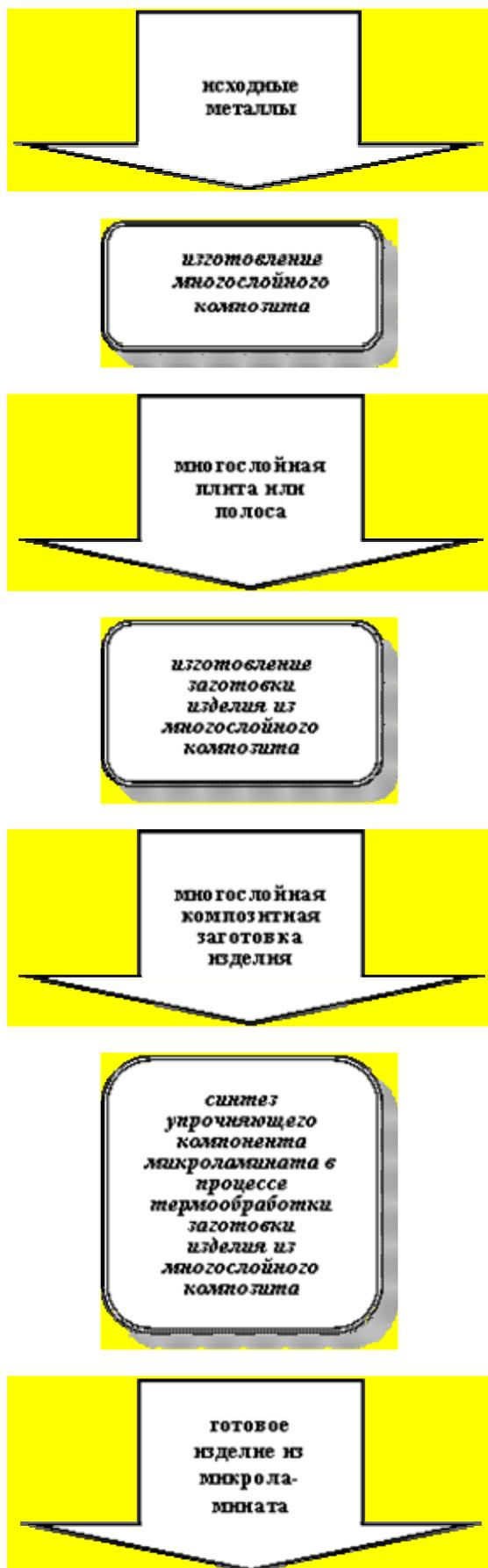


Рис. 4. Маршрутная схема производства изделий из микроламинатов

- формирование из этого композита заготовки изделия, конфигурация и размеры которой практи-

чески полностью совпадают с теми, которые должно иметь готовое изделие;

- трансформирование многослойной композитной заготовки в изделие из МЛ путем синтеза на границах раздела разнородных металлов соответствующих упрочняющих фаз в процессе термообработки заготовки по заданному режиму.

Первая стадия, описанная в предыдущем разделе, базируется на использовании сварки разнородных металлов по методу ГПВ и поэтому требует применения специального вакуумного прокатно-сварочного оборудования. Отметим, что расчетная производительность вакуумных прокатно-сварочных установок типа СВАПР, имеющихся в ННЦ ХФТИ, может обеспечить изготовление вакуумной прокаткой примерно 200 т многослойных композитов в год.

Вторая стадия осуществляется по общепринятым машиностроительным технологиям формирования изделий нужной конфигурации и размеров – это могут быть штамповка, гибка, различные виды обработки металлорежущим инструментом и др. Эти операции выполняются на обычном оборудовании и не сопряжены с трудностями, обусловленными спецификой строения многослойных композитов. Имеется в виду то обстоятельство, что суммарная доля переходных зон между слоями из разнородных металлов в объеме многослойного композита составляет всего несколько процентов. Поэтому влияние их свойств, отличных от свойств матричных металлов, не сказывается существенно на обрабатываемости и других технологических характеристиках композитов по сравнению с матричными металлами.

Третью стадию следует осуществлять с использованием современного термического оборудования, обеспечивающего возможность проведения термообработки в защитных средах или в вакууме. Выбор параметров термообработки должен базироваться на результатах предварительных исследований особенностей термоактивируемой эволюции строения и свойств МЛ.

Приведенные выше данные достаточно полно и аргументировано обосновывают наш вывод о том, что метод ГПВ потенциально имеет весьма благоприятные перспективы использования его в крупномасштабном производстве разнообразных многослойных композитов и, в конечном итоге, изделий из МЛ. Но вполне очевидно, что реализуемость этих перспектив во многом будет зависеть от наличия рыночного спроса на эти изделия.

Вопрос о конкретных сегментах рынка изделий из микроламинатов и их возможной емкости на сегодняшний день является сложным и достаточно дискуссионным. Мы изложим свою точку зрения на некоторые аспекты этого вопроса, акцентируя внимание на общности и различии этих аспектов для МЛ и ВКМ.

Прежде всего, отметим, что основные результаты фундаментальных и прикладных исследований в области ВКМ были получены еще в 60-70-х годах прошлого века, а МЛ стали интересовать материаловедов и конструкторов только в последние годы [1]. Об этом свидетельствуют хронология и объем

публикаций, посвященных этим двум типам композитов.

Следовательно, сегодня МЛ находятся только в начале пути к созданию на их основе новых промышленных изделий, в то время как ВКМ прошли эту стадию своего становления почти полвека назад. Такое отставание можно связать с тем, что в то время еще не были развиты эффективные методики получения МЛ, а также еще не были установлены пределы рационального применения ВКМ, связанные с высокой анизотропией их свойств.

Опираясь на богатый практический опыт получения и успешного применения ВКМ, можно ожидать, что качественно аналогичные результаты будут получены и в области МЛ. Главным доводом в пользу реалистичности этого прогноза является то, что и МЛ, и ВКМ появились и совершенствуются на базе одной и той же плодотворной материаловедческой идеи. Она состоит в использовании для упрочнения макроразмерных металлических изделий из МЛ (из ВКМ) двумерных (одномерных) неметаллических армирующих фрагментов, толщина (диаметр) которых лежит в микрометровом диапазоне.

В заключение этой публикации нам представляется возможным сделать общий вывод о том, что дальнейшее развитие нашего подхода к получению изделий из МЛ, несомненно, позволит не только повысить уровень изотропии свойств тех изделий, в которых уже используются ВКМ, но и приведет к появлению новых типов композитных изделий, в которых применение ВКМ нецелесообразно или невозможно. Опираясь на накопленный к настоящему времени экспериментальный задел, в обозримом будущем мы планируем разработать несколько типов МЛ такого функционального назначения:

- радиационно-защитные МЛ на основе систем из нескольких металлов с различными атомными номерами;
- радиационно-стойкие МЛ на основе систем из разнородных ОЦК-металлов;
- МЛ с высокими удельными механическими свойствами и жаропрочностью на основе систем Al-

Ti, Fe-Ti, Ni-Ti для авиационной, ракетно-космической техники и автомобилестроения;

- МЛ с особыми магнитными свойствами на основе системы Cu-Fe для радиоэлектронных изделий;
 - МЛ на основе систем из сталей с различным содержанием углерода и других легирующих элементов для лопаток паровых турбин, различных режущих изделий, бронезащитных структур и др.;
 - МЛ на основе системы Cu-Al для высокопрочных электропроводящих изделий;
 - МЛ на основе системы ниобий-оловянистая бронза для низкотемпературных сверхпроводников.
- Эта публикация подготовлена в рамках выполнения проекта № 3481 УНТЦ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Композиционные материалы*. Справочник / Под ред. Д.М.Карпиноса. Киев: «Наукова думка», 1985, 592 с.
2. http://library.mephi.ru/data/scientific-sessions/2002/Innovac_1/181.html
3. <http://issp3.issp.ac.ru/lmf/>
4. С.Ю. Диденко, Н.И. Ильченко, Н.Д. Рыбальченко. Вакуумная прокатка: история и перспективы развития // *Академик Виктор Евгеньевич Иванов*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2008, с. 115-127.
5. В.М. Ажажа, В.М. Амоненко, Г.П. Ковтун и др. Свойства многослойных металлических композиций из тугоплавких металлов // *Физика и химия обработки материалов*. 1967, № 5, с. 69-74.
6. В.М. Амоненко, А.С. Тронь, В.В. Мухин и др. Получение биметаллов прокаткой в вакууме и их свойства // *Цветные металлы*. 1966, № 12, с.78-81.
7. С.Ю. Диденко, Н.И. Ильченко, И.М. Неклюдов, С.Л. Бондаренко. Получение методом горячей прокатки в вакууме слоистых и композиционных материалов типа медь-сталь и исследование их свойств // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2003, № 3, с. 158 - 160.

Статья поступила в редакцию 11.02.2010 г.

ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА ТА ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛЕВИХ МІКРОЛАМІНАТІВ, ОТРИМУВАНИХ ВАКУУМНОЮ ПРОКАТКОЮ

І.М. Неклюдов, В.А. Білоус, В.М. Восводін, С.Ю. Діденко, М.І. Ільченко, Ю.С. Діденко, Ю.М. Ільченко

На основі результатів порівняльного аналізу характеристик шарчастих і волокнистих композитів, обґрунтовано концепцію отримання та використання нового типу композиційних матеріалів – металевих мікроламініатів з двовимірними армуючими елементами. Показано перспективність застосування вакуумної прокатки у виробництві багатошарових композитів і мікроламініатів.

PROSPECTS OF MANUFACTURING AND USE OF METAL MIKROLAMINATES OBTAINED BY VACUUM ROLLING

I.M. Neklyudov, V.A. Bilous, V.M. Voyevodin, S.Yu. Dihdenko, M.I. Ichenko, Yu.S. Didenko, Yu.M. Ichenko

Based on the results of comparative analysis of characteristics of laminated and fibrous composites, the concept of obtaining and using a new type of composite material – metal microlaminates with two-dimensional reinforcing elements is substantiated. The prospectivity of application of vacuum rolling in production of multilayer composites and microlaminates is demonstrated.