

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА МИКРОЛАМИНАТОВ СИСТЕМЫ МЕДЬ-ЖЕЛЕЗО

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

Приведено описание экспериментальных результатов получения микроламинатов с максимальным количеством слоев 1620 и изучения структуры и свойств этих композитов. Представлена экспериментально установленная зависимость механических характеристик микроламинатов от количества их слоев и параметров термообработки. Предложены механизм взаимосвязи между структурой и механическими характеристиками микроламинатов и модель их эволюции в процессе термообработки композитов.

ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАНИЙ

Микроламинаты (далее в тексте – МЛ) – это один из видов металлических композиционных материалов слоистого строения с двумерными армирующими компонентами. Этими компонентами являются тонкие переходные зоны между слоями из двух и более различных металлов или сплавов, представляющих собой матрицу композита.

Переходные зоны – это результат взаимодиффузии компонентов матричных металлов, протекающей в процессе термообработки композита. В зависимости от типа диаграммы состояния контактирующих металлов, образующиеся между ними переходные зоны представляют собой сплошные слои твердорастворных фаз, интерметаллидных соединений и/или фаз внедрения (карбидов, нитридов и др.).

МЛ отличаются от других видов металлических слоистых композитов (далее – МСК) двумя особыми признаками. Первый – это большое количество слоев (порядка $10^2 \dots 10^3$) в 1 мм толщины этого вида композитов, а второй – малая толщина переходных зон, лежащая в диапазоне порядка $10^{-1} \dots 10^1$ мкм.

Из приведенных структурно-размерных признаков следует, что в МЛ суммарная объемная доля переходных зон может составлять проценты и даже десятки процентов объема композита. Поэтому вклад определенного свойства переходных зон в соответствующее свойство МЛ в целом может быть весьма существенным, что аналогично вкладу свойств волокон в характеристики волокнистых композитов.

В работе [1] описан предложенный и развиваемый нами подход к проблеме получения микроламинатов и изделий из них. В целом процесс производства изделий состоит из трех основных этапов:

- изготовление многослойного композита с большим удельным числом слоев;
- формирование из этого композита заготовки изделия, конфигурация и размеры которой практически 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.

Понятно, что выбор параметров термообработки МСК определенного типа должен базироваться на результатах предварительных исследований особенностей термоактивируемой эволюции строения и свойств этих композитов и продуцируемых из них МЛ.

В качестве объекта наших исследований были выбраны МСК и МЛ системы медь-железо. Это довольно доступные металлы, широко используемые в практике изготовления различных изделий. Пара медь-железо входит в состав многих биметаллов типа тугоплавкий металл–сталь, термическая стабильность этой пары, диаграмма состояния и характер диффузионных процессов в ней изучены довольно подробно [2-5]. Результатом взаимной диффузии в этой паре являются твердые растворы с невысокой концентрацией диффундирующего элемента (при 800 °С предел растворимости меди в железе составляет примерно 1,4 вес.%, а железа в меди – 0,9 вес.%), интерметаллические соединения в бинарной системе медь-железо отсутствуют [3-5].

Еще одним аргументом в пользу выбора меди и железа в качестве базовой системы в наших экспериментах послужила их высокая пластичность при комнатной температуре. Ожидалось, что изготовление МСК системы медь-железо с большим удельным количеством слоев (количество слоев в 1 мм его толщины) особых трудностей не вызовет. Кроме того, МСК и МЛ на основе системы медь-железо являются весьма перспективными материалами с высокими демпфирующими характеристиками и уникальными анизотропными электропроводностью и магнитопроводностью, существенно различающимися в направлениях вдоль и перпендикулярно плоскости слоев.

Вместе с тем, известные в настоящее время расчетные методики оценки кинетики эволюции структурно-фазового состояния МСК и ее влияния на механические свойства композитов не позволяют получить практически применимые результаты. Это связано с тем, что эти методики 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 трансформирования МСК в МЛ.

Поэтому основным содержанием наших исследований являлось проведение экспериментов, направленных на решение двух основных задач. Одной из них было получение экспериментальных данных, позволяющих судить об общих закономерностях получения МСК по методике, основанной на циклическом и многократном применении метода горячей прокатки в вакууме для твердофазной сварки металлов разного состава [1].

Другая задача исследований – выявление и изучение термомеханических эффектов, которые обусловлены трансформированием МСК в МЛ и проявляются в изменении механических свойств, микротвердости и структуры исследуемых объектов.

МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для обеспечения исследований экспериментальным материалом были изготовлены МСК в виде полос толщиной 1 мм с количеством слоев от 3 до 1620. Исходными материалами являлись полосы из меди М1 и стали 20 толщиной 2 мм и 5...10 мм соответственно, из которых были изготовлены прямоугольные карточки размером 100x200 мм. Далее следовала очистка свариваемых поверхностей карточек от всевозможных загрязнений, наличие которых отрицательно сказывается на сплошности и прочности сварного соединения всех слоев композита. Очищенные карточки собирали в чередующейся последовательности так, что наружные слои пакета были медными.

Далее в прокатно-сварочной установке СВАПР этот исходный пакет нагревали до температуры около 800 °С в вакууме 10^{-2} Па и прокатывали за один проход с относительным обжатием примерно 30 %. После остывания композитную заготовку извлекали на атмосферу и подвергали холодной прокатке до толщины 2 мм.

По описанной схеме получали композитные заготовки с небольшим числом слоев – до 20. Для получения МСК с гораздо большим числом слоев применяли более сложный циклический маршрут. Его суть состоит в том, что из композитной полосы с небольшим числом слоев отрезают несколько карточек и, накладывая их друг на друга, собирают пакет. Далее этот пакет, состоящий уже не из монометаллов, а из МСК, сваривают прокаткой в вакууме и раскатывают на воздухе до толщины примерно 2 мм.

Необходимость применения этой схемы обусловлена тем, что изготовить исходный пакет толщиной, например, 20 мм из нескольких сотен слоев практически невозможно. Действительно, выполнение операций очистки такого большого числа фольг (толщиной порядка 10^{-1} мм и площадью $\sim 10^4$ мм²) и последовательной укладки их в пакет не только весьма трудоемко, но и не гарантирует полной и качественной очистки или предотвращения попадания загрязнения на свариваемые поверхности в процессе сборки пакета.

Понятно, что различия в термомеханической предыстории МСК с разным количеством слоев неизбежно приводят к определенным отличиям в их

свойствах и структурном состоянии. Для минимизации этих отличий на заключительном этапе изготовления исследовательских образцов все композитные полосы толщиной 2 мм подвергали отжигу в вакууме при температуре 750 °С в течение 1 ч и последующей холодной прокатке с суммарным обжатием 50%. Состояние лент из МСК толщиной 1 мм после указанной заключительной термомеханической обработки было принято за их исходное состояние.

Из лент, полученных описанным образом, изготавливали образцы для механических испытаний, измерений микротвердости и металлографических исследований.

Форма образцов для механических испытаний приведена на рис. 1. Длина рабочей части образцов составляла 10 мм, а ее ширина – 3,5 мм.

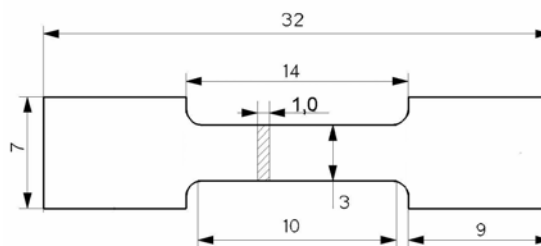


Рис. 1. Образцы для проведения механических испытаний

Механические испытания проводили при комнатной температуре с использованием разрывной машины типа INSTRON-5581. Скорость деформации составляла 2 мм/мин. Фиксировали значения пределов прочности и текучести образцов из испытываемых МСК, а также их относительное удлинение.

Были определены основные характеристики механических свойств МСК с количеством слоев 3, 11, 21, 62, 182, 540, 1080 и 1620 в их исходном состоянии. Установлено, что значения этих характеристик МСК имеют слабо выраженную тенденцию к возрастанию по мере увеличения количества слоев композитов.

Трансформирование образцов из МСК в МЛ осуществлялось путем отжигов образцов из МСК в вакууме при температуре 750 °С. Длительность отжигов составляла 1, 2 и 3 ч.

Механические испытания образцов из МЛ проводили так же, как и образцов из МСК. Установлено, что определенная зависимость механических характеристик МЛ от количества их слоев начинает проявляться, начиная только со 182 слоев. Поэтому на рис. 2 приведены данные о механических характеристиках МСК в исходном состоянии и МЛ с количеством слоев не менее 62.

Металлографические исследования микроструктуры МСК и МЛ проводили по общепринятым методикам световой микроскопии с использованием приборного комплекса GX-51.

Фотографии типичных микроструктур МСК и МЛ показаны на рис. 3. Установлено отсутствие несплошностей (непроваров) на границах раздела слоев из меди и стали, а также структурно-фазовых составляющих, отличающихся по тривимости от меди и стали.

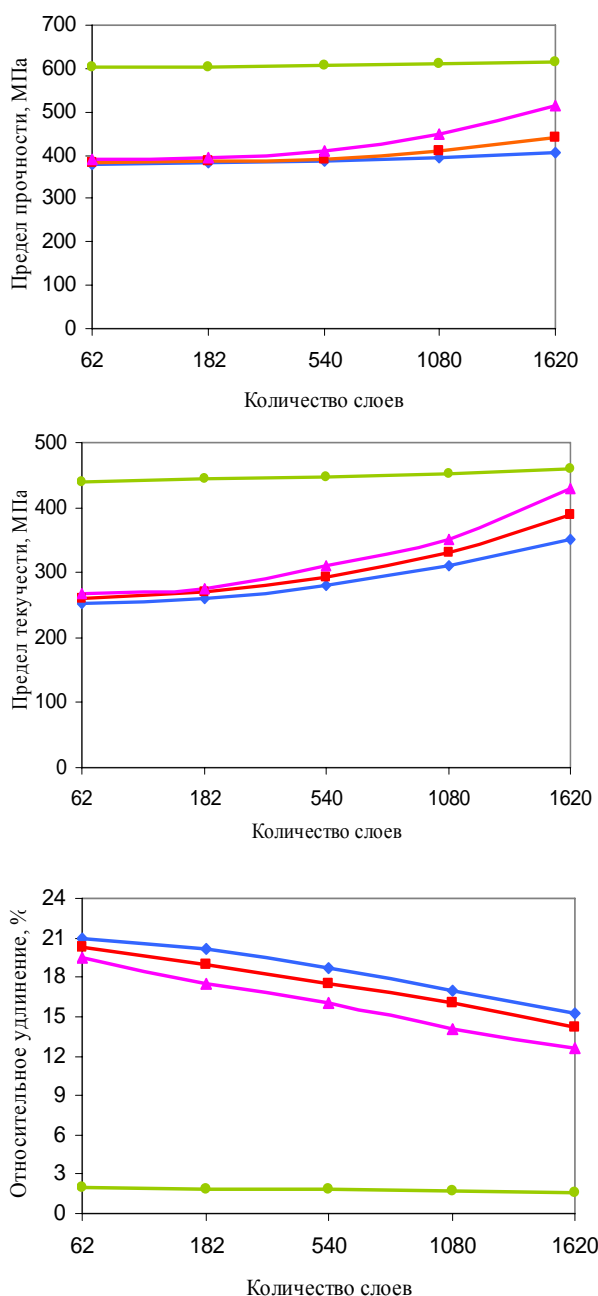


Рис. 2. Зависимость предела прочности, предела текучести и относительного удлинения от количества слоев:

- МСК в исходном состоянии;
- ◆— МЛ после отжига 750 °С, 1 ч;
- МЛ после отжига 750 °С, 2 ч;
- ▲— МЛ после отжига 750 °С, 3 ч

Единственным отличием микроструктур МСК и МЛ является отсутствие в последних волокнистой текстуры, порожденной холодной прокаткой МСК на завершающем этапе их изготовления.

Показано, что с увеличением количества слоев в МСК и МЛ появляются ограниченные участки в слоях меди, толщина которых имеет нанометрический масштаб (порядка 0,1 мкм и менее). Наиболее отчетливо эта структурная особенность характерна для композитов с количеством слоев 1080 и 1620.

Микротвердость слоев композитов измеряли с использованием прибора NanoIndenter G200 (производства MTS Systems, USA), оснащенного трехгранной пирамидкой Берковича с радиусом затупления при вершине около 0,02 мкм. Измерения проводили до глубины погружения индентора 0,2 мкм, при этом нагрузка достигала 4 мН (примерно 0,4 г). Прецизионная точность нагружения и измерения смещений обеспечивается прибором в автоматическом режиме с помощью электромагнитного привода и емкостных датчиков перемещения.

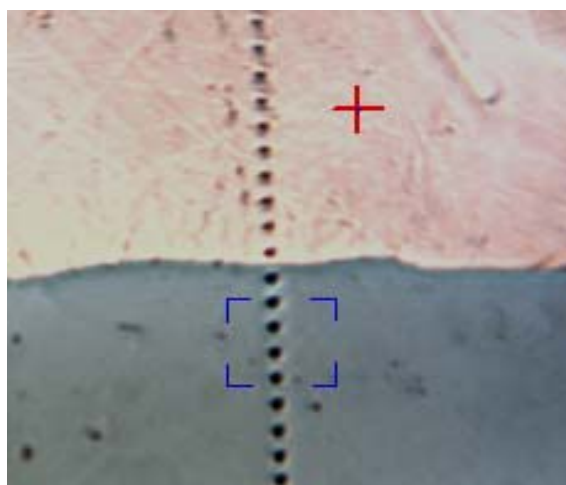
Отпечатки наносились на расстоянии 3 мкм (по оси X) и 5 мкм (по оси Y) друг от друга (см. рис. 3, а и б), при этом величина поперечника отпечатков составляла около 1 мкм. Цепочки отпечатков ориентировали под разными углами к границам раздела слоев меди и стали для получения надежных данных о твердости слоев меди и стали толщиной 2...3 мм, которые непосредственно примыкают к границе раздела этих металлов.

Выявить различия в твердости приграничных и удаленных от границы областях меди удалось только для композитов с количеством слоев не более 182. Это связано с тем, что средняя толщина слоев меди в композитах со 182 слоями составляет уже примерно 3 мкм и, как отмечено выше, с увеличением количества слоев уменьшается вплоть до сотен нанометров.

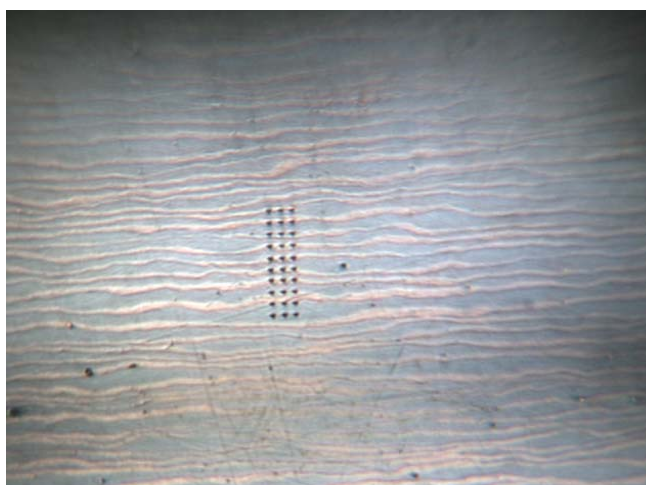
В композитах с количеством слоев до 182 в приграничных зонах твердость меди примерно на 15 % выше твердости участков, удаленных от границы раздела слоев. Ширина этих зон была оценена величиной 1...2 мкм для меди, причем их твердость возрастает по мере увеличения длительности отжига примерно до 20 % твердости удаленных участков. В стальных слоях ширина зон с повышенной на 10...15 % твердостью оценена величиной 1 мкм для всех композитов. Таким образом, общая ширина переходных зон между слоями меди и стали, отличающихся от этих металлов повышенной твердостью, составляет примерно 2...3 мкм.

Величину объемной доли меди в МСК определяли с использованием металлографической и пикнометрической методик. Последнюю применяли потому, что границы раздела слоев из меди и стали искривлены и не параллельны. Наиболее ярко эта структурная особенность выражена в МСК с большим количеством слоев (см. рис. 3). Следствием этого является большой разброс результатов нескольких измерений толщины отдельных слоев (с последующим их суммированием), выполненных металлографическим методом для одного и того же образца.

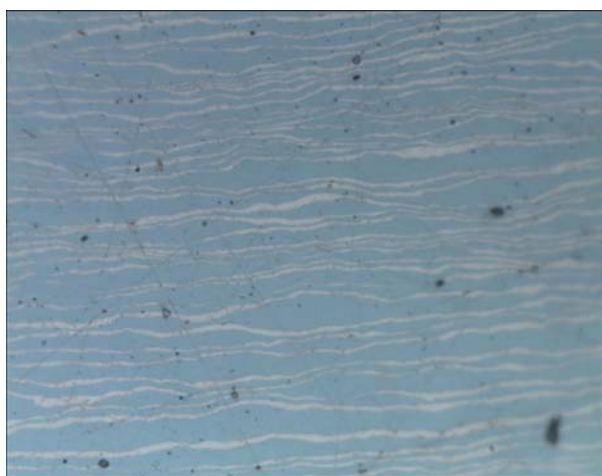
Вместе с тем, сравнение величин объемной доли меди в МСК с небольшим количеством слоев, полученных по разным методикам, показало их практически полное совпадение. Установлен характер зависимости объемной доли меди в МСК: она плавно уменьшается от 34 % (трехслойные МСК) до 30 % (МСК со 182 слоями) и далее остается практически неизменной на этом уровне для всех исследованных МСК с большим количеством слоев.



а



б



в



г

Рис. 3. Микроструктура МСК и МЛ: МСК с 62 слоями (x500) (а); МЛ с 540 слоями (x500) (б); МСК с 1620 слоями (x1000) (в); МЛ с 1620 слоями (x1000) (г)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Переходя к анализу результатов экспериментальных исследований, отметим, что обе их задачи, сформулированные выше, успешно решены.

Главным результатом исследований общих закономерностей получения МСК по избранной нами методике является экспериментальная демонстрация реальности получения МСК с большим количеством слоев в 1 мм толщины композита – на уровне 1500...2000. Вполне очевидно, что, сварив горячей вакуумной прокаткой пакет, состоящий 10...20 карточек толщиной 1...2 мм из таких МСК, можно получить плиту толщиной 10...15 мм с размерами в плане примерно 100x500 мм – технические характеристики прокатно-сварочной установки СВАПР позволяют это осуществить. Количество повторов технологического цикла может быть не более 4-5.

Следовательно, избранная нами методика, ключевым элементом которой является применение вакуумной прокатки, позволяет получать не только сравнительно небольшие полосы из МСК, предназначенные главным образом для исследований, но и довольно крупные композитные заготовки, пригодные для практического использования МСК и МЛ в различных промышленных изделиях.

Еще одним практически важным результатом

этих исследований является экспериментальное выявление динамики изменения объемной доли меди в МСК в процессе их изготовления по многоциклового схеме. Показано, что, несмотря на значительное различие в сопротивлении пластическому деформированию меди и стали, по избранной нами методике можно получать МСК с практически одинаковой объемной долей более пластичного компонента, но очень большим различием в количестве слоев. Следовательно, эта методика может быть успешно применена для получения МСК, компонентами которых являются весьма разнообразные металлы и сплавы, в том числе и существенно различающиеся своими механическими и технологическими характеристиками в широком температурном интервале. Примерами этих металлов являются такие пары, как Al и Ti, Al и Ni, Ti и Ni, Nb и БрОФ 6,5-0,15 и др.

Приступая к обсуждению второй группы результатов, полученных в исследованиях термокинетических эффектов, которые обусловлены трансформированием МСК в МЛ и проявляются в изменении механических характеристик композитов, сделаем общее замечание о связи свойств композитов слоистого строения с соответствующими свойствами их структурных составляющих.

Существуют различные расчетные методики, ис-

пользуемые для прогнозирования механических и других характеристик композитов слоистого строения на основе экспериментальных данных о соответствующих индивидуальных характеристиках их компонентов [6, 7]. В соответствии с простейшей из них определенная характеристика композита F_k в первом приближении рассматривается как аддитивная сумма произведений соответствующей индивидуальной характеристики их компонентов f_i на объемную долю этих составляющих в композите α_i , т.е. $F_k = \sum \alpha_i f_i$, причем $\sum \alpha_i = 1$ (так называемое правило смеси) вне зависимости от количества слоев композита.

Для обеспечения возможности применения этой методики к МСК и МЛ, были проведены механические испытания меди и стали, которые использовали для получения МСК и МЛ, после термомеханической обработки, копирующей режимы получения композитов. Применяя эти данные для пределов прочности и текучести, с учетом величины объемной доли меди в композитах, по правилу смеси вычислили соответствующие характеристики МСК и МЛ для всех значений количества их слоев, использованных в наших экспериментах.

Оказалось, что экспериментально определенные характеристики всех МСК в исходном состоянии превышают расчетные на 5...7 %. Для МЛ аналогичное различие находится на уровне 10...12 %, причем только при количестве слоев не более 62, а при большем количестве наблюдается существенное (на 15 % и более) превышение экспериментальных значений в сравнении с расчетными. При этом величина различия возрастает с увеличением количества слоев и длительности термического воздействия на МЛ в процессе термоактивированного трансформирования.

Иными словами, расчетная модель, основанная на учете только двух компонентов МЛ (меди и стали), неприменима к МЛ с количеством слоев 182 и более. Это указывает на то, что для МЛ с большим количеством слоев необходимо учитывать вклад механических характеристик переходных зон в соответствующие характеристики этих композитов.

Однако, просто добавить еще одно слагаемое в расчетную аддитивную сумму не представляется возможным по следующим двум обстоятельствам. Во-первых, определить достаточно точно (хотя бы на уровне 10 % погрешности) объемную долю переходных зон в МЛ очень сложно из-за описанных выше особенностей структуры этих композитов с большим количеством слоев.

Во-вторых, с использованием доступных нам методик невозможно определить индивидуальные механические характеристики переходных зон, состав которых довольно сложен и при этом изменяется по толщине зоны.

Поэтому в дальнейшем анализе полученных результатов сравнивали между собой только экспериментальные результаты, разделенные на три группы по признаку количества слоев МЛ, к которым эти результаты относятся. Первая группа – это МЛ с числом слоев порядка 10^1 (МЛ с 3, 11 и 21 слоями), вторая – с числом слоев порядка 10^2 (МЛ с 62 и 182

слоями) и третья – с числом слоев порядка 10^3 (МЛ с 540, 1080 и 1620 слоями). Для МЛ из первой группы объемная доля переходных зон может быть оценена величиной 2...3 %, из второй – 20...30 %.

Для третьей группы, как уже отмечалось выше, установить границы переходных зон не представляется возможным из-за чрезвычайно малой толщины слоев меди. Более того, видимо, можно говорить о том, что как таковой исходной меди М1 в этих МЛ уже нет – есть слои медного сплава, диффузионно-насыщенного компонентами стали, а объемная доля этого компонента МЛ равна объемной доле меди в исходных МСК, т.е. 30 %.

Рассмотрим возможные механизмы, которые позволяют интерпретировать данные о механических характеристиках МСК и МЛ, которые приведены на рис. 2. Для МСК в исходном состоянии пределы прочности и текучести имеют лишь слабую тенденцию к росту по мере увеличения количества слоев, и поэтому можно считать, что они практически равны для всех МСК вне зависимости от количества их слоев. Главный фактор, определяющий характеристики МСК, – это наклеп меди и стали в процессе холодной прокатки с суммарным обжатием 50 % на заключительном этапе получения МСК. Отсюда – хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных об этих характеристиках.

Значительное уменьшение пределов прочности и текучести и увеличение пластичности МЛ по сравнению с МСК – это, несомненно, результат трансформирующих отжигов. В процессе этих отжигов происходит не только развитие переходных зон, но и устраняется эффект наклепа меди и стали.

Некоторое ухудшение согласования расчетных и экспериментальных данных и их характеристик можно отнести на счет увеличения объемной доли переходных зон в МЛ первой группы по сравнению с МСК. В пользу этого предположения свидетельствует нарастание рассогласования расчетных и экспериментальных данных для МЛ второй и третьей групп.

Поэтому представляется разумным проводить сравнительный анализ экспериментальных значений характеристик МЛ второй и третьей групп относительно соответствующих характеристик МЛ первой группы. Данные о превышении значений пределов прочности и текучести МЛ в процентах к характеристикам МЛ с 62 слоями приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Сравнение значений предела прочности МЛ с 62 слоями и МЛ с большим количеством слоев

Длительность отжига, ч	Превышение, %			
	1	101	102	104
2	101	102	107	115
3	101	105	115	132
Количество слоев МЛ	182	540	1080	1620

Таблица 2

Сравнение значений предела текучести МЛ с 62 слоями и МЛ с большим количеством слоев

Длительность отжига, ч	Превышение, %			
	103	111	123	138
1	103	111	123	138
2	103	113	127	150
3	103	116	131	161
Количество слоев МЛ	182	540	1080	1620

Возрастание характеристик МЛ второй группы (по сравнению с первой) можно объяснить большей объемной долей переходных зон. Однако объяснить аналогичным образом превышение характеристик МЛ третьей группы над характеристиками второй группы не представляется возможным.

Этот наш вывод обоснован следующими обстоятельствами. Во-первых, объемные доли компонентов композитов на основе меди в МЛ из второй и третьей групп одинаковы. Во-вторых, механические характеристики материалов, из которых состоят эти компоненты, из-за низкой взаимной растворимости железа и меди не могут сильно отличаться от характеристик матричных металлов. Это подтверждается как литературными данными [8], так и результатами наших измерений микротвердости приграничных участков меди в МЛ с малым количеством слоев. Однако различие в характеристиках МЛ второй и третьей групп, например, со 182 и 1620 слоями, после отжига в течение 3 ч составляет для значений пределов прочности и текучести 30 и 56 % соответственно.

Поэтому для интерпретации столь значительного различия в характеристиках МЛ, видимо, требуется привлечь к рассмотрению дополнительные физические механизмы, эффективность влияния которых возрастает по мере увеличения количества слоев МЛ.

С учетом упомянутого факта существования в медных слоях МЛ с большим количеством слоев ограниченных участков меди, толщина которых имеет нанометрический масштаб, можно предположить, что именно наноструктурные эффекты являются причиной роста пределов прочности и текучести МЛ третьей группы по сравнению со второй. Так, в публикации [9] сделан вывод о том, что в слоистых композитах при толщинах их слоев 400 нм и менее, эффективными препятствиями для движения дислокаций являются межслойные (межфазные) границы.

Таким образом, механические характеристики МЛ, видимо, контролируются совместно физическими механизмами двух типов: диффузионно-обусловленными (термодиффузионными) и масштабно-обусловленными (наноструктурными). На характеристики МЛ с малым количеством слоев (порядка $10^1 \dots 10^2$) превалирующее влияние оказывают механизмы первого типа, а на характеристики МЛ с большим количеством слоев (порядка 10^3) влияют механизмы обоих типов совместно.

Кроме того, отмеченная тенденция возрастания

значений механических характеристик МСК по мере роста количества их слоев, по-видимому, также связана с проявлением наноструктурных эффектов, которые наблюдаются в исходных композитах слабее, чем в отожженных.

Обращает на себя внимание результат сравнения механических характеристик МСК в исходном состоянии и МЛ с 1620 слоями после отжига в течение 3 ч (см. рис. 2). Значения пределов прочности и текучести МЛ меньше, чем у МСК на 16 и 7 % соответственно, зато относительное удлинение МЛ больше на 65 %.

Это свидетельствует о том, что изделия из МЛ с большим количеством слоев, полученные отжигом заготовок изделий из МСК, обладают значительно лучшим сочетанием прочности и пластичности по сравнению с заготовками. Используя данные, приведенные на рис. 2, можно в довольно широких пределах варьировать механические характеристики изделий, полученных с использованием одного и того же вида МСК, в зависимости от функционального назначения конкретных изделий.

В завершение обсуждения экспериментальных результатов отметим, что исследовательские образцы, использованные в исследованиях, можно рассматривать как своеобразные изделия, полученные в соответствии с предложенной методикой изготовления изделий из МЛ. Таким образом, получено экспериментальное подтверждение результативности и эффективности этой методики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально отработана методика получения изделий из микроламинатов системы медь-железо с максимальным количеством слоев 1620 путем термообработки заготовок изделий, изготовленных из многослойных композитов с соответствующим количеством слоев из этих разнородных металлов.

2. На примере микроламинатов системы медь-железо впервые продемонстрирована возможность получения (с использованием вакуумных прокатки и термообработки) таких прочностных характеристик микроламинатов, которые не намного ниже, чем у исходных многослойных композитов (пределы прочности и текучести на 16 и 7 % соответственно), но пластичность – значительно выше (относительное удлинение микроламинатов почти на порядок больше).

3. Полученные экспериментальные данные о кинетике эволюции микроламинатов системы медь-железо в процессе их отжига при 750 °С могут быть использованы для определения таких температурно-временных параметров термообработки заготовки из конкретного многослойного композита, которые обеспечивают изделию из микроламината требуемый уровень его механических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.М. Неклюдов, С.Ю. Диденко, Н.И. Ильченко и др. Перспективы производства и использования металлических микроламинатов, получаемых ва-

- куумной прокаткой // *Наст. номер*, с. 89-94.
2. К.Е. Чарухина, С.А. Голованенко, В.А. Мастеров, Н.Ф. Казаков. *Биметаллические соединения*. М.: «Металлургия», 1970, 278 с.
 3. О. Кубашевски. *Диаграммы состояния двойных систем на основе железа*: Справ. изд. / Пер. с англ. М.: «Металлургия», 1985, 184 с.
 4. О.А. Банных, П.Б. Будберг, С.П. Алисов и др. *Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа*: Справ. изд. М.: «Металлургия», 1986, 440 с.
 5. *Двойные и многокомпонентные системы на основе меди*: Справочник. М.: «Наука», 1979, 247 с.
 6. *Композиционные материалы*. Справочник / Под ред. Д.М. Карпиноса. Киев: «Наукова думка», 1985, 592 с.
 7. Т. Фудзии, М. Дзако. *Механика разрушения композиционных материалов* / Пер. с японского. М.: «Мир», 1982, 232 с.
 8. Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*. М.: «Металлургия», 1981, 416 с.
 9. М.И. Карпов. *Пластическое поведение и механические свойства многослойных композиционных материалов в наноразмерной области*. Черноголовка: Институт физики твердого тела РАН, 2008, 24 с.

Статья поступила в редакцию 11.02.2010 г.

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ І СТРУКТУРА МІКРОЛАМІНАТІВ СИСТЕМИ МІДЬ-ЗАЛІЗО

І.М. Неклюдов, В.А. Білоус, В.М. Восводін, С.Ю. Діденко, М.І. Ільченко, Ю.С. Діденко, Ю.М. Ільченко, О.Г. Руденко, Г.Н. Толмачова

Наведено опис експериментальних результатів отримання мікроламінітів з максимальною кількістю шарів 1620 та вивчення структури і властивостей цих композитів. Представлено експериментально встановлену залежність механічних характеристик мікроламінітів від кількості їх шарів і параметрів термообробки. Запропоновано механізм взаємопов'язаності між структурою і механічними характеристиками мікроламінітів та модель їх еволюції в процесі термообробки композитів.

MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF MIKROLAMINATES OF COPPER-IRON SYSTEM

I.M. Neklyudov, V.A. Bilous, V.N. Voyevodin, S.Yu. Dihdenko, N.I. Ilchenko, Yu.S. Didenko, Yu.N. Ilchenko, A.G. Rudenko, G.N. Tolmashova

Experimental results of obtaining microlaminates with maximum number of layers 1620 and of study of structure and properties of these composites are described. Experimentally established dependence of the mechanical characteristics of microlaminates on the number of layers and heat treatment parameters is presented. The mechanism of relationship between structure and mechanical characteristics of microlaminates and model of their evolution during heat treatment of composites is suggested.