

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДИФФУЗИЯ

УДК 621.791.12

ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

© 2022 г. М. С. Пушкин^{a, b, *}, Б. А. Гринберг^a, В. П. Пилюгин^a, А. В. Иноземцев^a,
А. М. Пацелов^a, Ю. П. Бешапошников^c

^aИнститут физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия

^bУрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

^cООО “Протол”, пер. Автоматики, 3, Екатеринбург, 620049 Россия

*e-mail: limon.5ddd@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.04.2022 г.

После доработки 26.09.2022 г.

Принята к публикации 28.09.2022 г.

При получении слоистых композиционных материалов методом сварки взрывом особенности формирования поверхности раздела между сцепляемыми материалами можно объяснить с помощью теории самоорганизации открытых систем. Если такую поверхность раздела рассматривать как открытую систему, то с помощью самоорганизации можно объяснить ее эволюцию при интенсификации режима сварки. Последующее интенсивное внешнее воздействие (сдвиг под высоким давлением) стремится уничтожить структуру, полученную благодаря самоорганизации поверхности раздела при сварке взрывом, а затем создать новую структуру.

Ключевые слова: сварка взрывом, поверхность раздела, фракталы, самоорганизация, вихри

DOI: 10.31857/S0015323022600381

ВВЕДЕНИЕ

Эффективным способом соединения материалов и создания на этой основе высокопрочных биметаллических и многослойных композитов является сварка взрывом. Однако для получения новых свойств композиционных материалов необходимо понимание физической природы процессов, протекающих при формировании данных композитов. Значительный интерес представляет также класс открытых систем, для которых поверхность раздела особым образом структурирована вследствие коллективного поведения некоторых ее частей [1–7].

К настоящему времени имеется большое количество исследований, посвященных анализу процессов, происходящих при сварке взрывом. При этом большинство методов анализа, описываемых в литературе, базируется на оптической микроскопии поперечных сечений поверхности раздела, что может быть недостаточно для выявления закономерностей формирования получаемых соединений.

Поскольку свариваемые взрывом материалы в определенной мере можно рассматривать как класс открытых систем с большой подводимой энергией, находящихся далеко от равновесия, представляет интерес объяснить многие особен-

ности возникающей при этом внутренней структуры с помощью теории самоорганизации. Также нужно отметить, что для изучения самоорганизации, часто используют метод фрактального расчета, который является количественной мерой анализа диссипативных процессов.

Объединяя вышеперечисленные положения, можно прийти к следующей картине, происходящей в системе, проявляющей внутреннюю самоорганизацию. Подходящим способом, подводя к образцу внешний достаточно мощный источник энергии, можно “вынудить” систему эволюционировать за счет усиления нелинейных эффектов и значительного роста флуктуаций [3, 7]. Система уходит из слабо-неравновесного состояния к состоянию с сильной неравновесностью. Появляются дальнедействующие корреляции, а также коллективное поведение возникающих вновь подсистем. Происходит самоорганизация, заключающаяся в пространственном упорядочении структуры на различных масштабных уровнях.

Цель работы – представить общую схему процессов самоорганизации сварного соединения, используя данные, полученные в предыдущих статьях авторов [8–14] для двухслойных композитов (Cu–Ta, Cu–Ti). Проверить повторяемость полученной схемы на новых образцах (многослойный композит Cu–Ta). А также проанализи-

ровать изменения в структуре вызванные добавлением еще одного сильного внешнего воздействия (кручения под высоким давлением).

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе приведены результаты исследований следующих материалов: многослойный композит Cu–Ta (состоит из семи слоев и, соответственно, из 6 переходных границ), двухслойный композит Cu–Ta и двухслойный композит Cu–Ti.

Сварку проводили в Волгоградском государственном техническом университете, а также в ОАО “Уралхиммаш”. Схема сварки: параллельное расположение пластин. На верхней (плакирующей) пластине размещали заряд взрывчатого вещества [8].

В качестве исходных материалов для получения соединений были выбраны тантал (марки ТВЧ), медь марки М1 и технически чистый титан марки ВТ1-0.

Используемое взрывчатое вещество — это смесь аммиачной селитры мелкого помола (в качестве окислителя) с древесной мукой или керосином (в качестве горючего) и кварцевым песком (инертная добавка для снижения скорости детонации).

Многослойное сварное соединение Cu–Ta получается благодаря последовательному соударению пластин [8]. Важно подчеркнуть, что сварка в данном случае происходит за один этап. После инициации взрывчатого вещества метаемая пластина падает на лежащую под ней пластину, начиная тем самым формировать первый переходный слой. При этом вся конструкция продолжает двигаться вниз. После соударения со следующей пластиной формируется второй переходный слой. Аналогично получают все остальные исследуемые поверхности раздела. Далее приведены параметры режимов сварки для изучаемых переходных зон (скорость точки контакта одна и та же $V_k = 2400$ м/с). (1) — $\gamma = 10.63^\circ$, (2) — $\gamma = 11.23^\circ$, (3) — $\gamma = 11.01^\circ$, (4) — $\gamma = 10.96^\circ$, (5) — $\gamma = 10.86^\circ$, (6) — $\gamma = 10.77^\circ$, здесь γ — угол соударения.

Двухслойный композит Cu–Ta. В работе используются результаты, полученные нами в предыдущих работах [9]. Внизу приведены данные для двухслойного композита медь–тантал, имеющего следующие параметры режима сварки: C_p ($\gamma = 5.2^\circ$, $V_k = 2571$ м/с). Нужно отметить, что индекс “р” обозначает форму поверхности раздела (плоская).

Двухслойный композит Cu–Ti. В работе используются результаты, полученные нами в предыдущих работах [10, 11]. Для того, чтобы убедиться в идентичности работы нашего принципа для других материалов, внизу приведены данные

для двухслойного композита медь–титан, имеющего следующие параметры режима сварки: (1') ($\gamma = 14.5^\circ$, $V_k = 1900$ м/с), (2') ($\gamma = 15^\circ$, $V_k = 2100$ м/с), (3) ($\gamma = 13^\circ$, $V_k = 2300$ м/с), (4') ($\gamma = 9^\circ$, $V_k = 2500$ м/с).

При выполнении исследований в работе использовали три способа получения информации о рельефе поверхности: 1) Продольное сечение образца; 2) Поперечное сечение образца; 3) Изображение поверхности Ta и Ti, полученное с помощью удаления меди реактивом (1 часть HNO_3 + 1 часть H_2O).

Исследования микроструктуры проводили с помощью метода сканирующей (СЭМ) электронной микроскопии (QUANTA 200 FEI Company). При описании изменения морфологии поверхностей раздела в статье, в том числе, будут использованы термины, соответствующие визуальным ассоциациям при наблюдении поведения ламинарного и турбулентного течения жидкостей: “всплеск”, “волна”, “вихрь” и т.д.

2. ОБЩАЯ СХЕМА ПРОЦЕССОВ САМООРГАНИЗАЦИИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

В момент инициации взрывчатого вещества (ВВ) метаемая пластина падает на неподвижную. Когда часть метаемой пластины уже соприкасается с неподвижной, направленное действие реакции взрывчатого вещества продолжается, принуждая пластины находиться в контакте и, в конечном счете, свариваться. Когда взрывчатое вещество заканчивается, большая часть пластин успевает свариться. Таким образом, химическая энергия ВВ переходит в кинетическую, которую фактически мы и считаем подводимой энергией. Также надо отметить, что данный тип энергии не переходит обратно в кинетическую энергию по причинам, описанным выше. Эта энергия “идет” на изменение внутренней энергии металлов, локализованной вблизи контактной поверхности. Также важна быстротечность данного процесса.

Изменения внутренней энергии, локализуемые вблизи контактирующих поверхностей, приводят к развитию процессов самоорганизации. В наших предыдущих работах [9–12] установлено, что микроструктура композитов на основе меди, при интенсификации режима сварки подчиняется следующим правилам: переход из области ниже нижней границы (НГ) окна свариваемости [9] непосредственно к НГ сопровождается консолидацией отдельных выступов в регулярно распределенные всплески, направление которых хаотично (так называемая плоская граница). Окно свариваемости — область значений углов соударения и скоростей контакта, при которых сварка взрывом имеет положительный результат,

т.е. происходит достаточно прочное сцепление поверхностей раздела соединяемых материалов. Дальнейшее увеличение количества подводимой энергии в систему приводит к формированию квазиволновой поверхности, на которой одновременно сосуществуют как всплески, так и разнонаправленные волны с различными амплитудами. Завершающим этапом является образование волнообразной границы в центре окна свариваемости.

Таким образом механизмы изменения внутренней энергии, которые успевают произойти за короткое время воздействия взрывом: образование выступов, образование всплесков, формирование изрезанности на поверхности раздела, образование волны, локальное расплавление, фрагментация типа дробления, образование вихрей и др. Необходимо подчеркнуть, что каждое соединение, и даже каждый конкретный образец характеризуется собственным набором механизмов диссипации энергии, а также количественным распределением энергии при реализации данных механизмов. Например, для некоторых соединений Cu–Ti не было обнаружено зон расплава [11], т.е. механизм создания зон расплава осуществляется не всегда.

Считается, что одной из важнейших движущих сил самоорганизации, наряду с избытком свободной энергии и, соответственно, стремлением к максимуму энтропии, является скорость диссипации энергии (или скорость производства энтропии). Именно в возможности “выбора” системой между различными путями (траекториями), по которым осуществляется тот или иной процесс, и состоит сущность явлений самоорганизации. Система “выбирает” из нескольких возможных тот путь, который обеспечивает наиболее быстрые превращения (реакции), даже если это приводит к образованию термодинамически менее стабильных систем, чем те, которые соответствуют максимальному выигрышу в свободной энергии [13, 14].

Исходя из вышеописанного принципа, нами был предложен процесс самоорганизации переходной зоны, с помощью которого распределяется подводимая энергия в сварном соединении. Мы разбиваем данный процесс на несколько этапов:

- 1) Зарождение выступов и их рост.
- 2) Консолидация выступов и переход к всплескам.
- 3) Консолидация всплесков и переход к волнам.

Зарождение выступов и их рост. На самом первом этапе по поверхности раздела возникают отдельно расположенные выступы. Дальнейшее увеличение подводимой энергии приводит к появлению все большего количества выступов, которые заполняют все имеющееся пространство. Подобное поведение системы заставляет поверхность раздела качественно измениться: теперь

каждый выступ “вынужден” взаимодействовать друг с другом.

Консолидация выступов и переход к всплескам. На данном этапе активно начинают действовать процессы самоорганизации. Система пытается “израсходовать” подводимую энергию. Выступы начинают накладываться друг на друга, создавая новый тип рельефа – всплески, где уже нет отдельных объектов, и вся поверхность раздела становится связанной единой структурой. Всплески имеют достаточно регулярное распределение по поверхности. Но из-за того, что они были сформированы из выступов разной высоты, их амплитуды могут различаться на 30–40% на выделенном участке. Каждый всплеск представляет из себя сложную, шероховатую структуру, для описания которой используется фрактальный метод (остается некоторая доля хаотичности поверхности). Таким образом, можно сказать, что получаемая на данном этапе поверхность (всплески) создается в результате самоорганизации выступов. В этом проявляется коллективное поведение системы.

Консолидация всплесков и переход к волнам. Как и в предыдущем случае, у системы возникает необходимость в “избавлении” от подводимой энергии, только в другом количестве. Ситуацию можно рассматривать, аналогично второму этапу. Теперь всплески начинают накладываться друг на друга, создавая новый тип рельефа – волны. Волны еще более регулярно распределены по поверхности раздела (перепады амплитуд здесь минимальны, однако сами амплитуды стали на порядок выше). Таким образом, можно сказать, что получаемая на данном этапе поверхность (волны) создается в результате самоорганизации всплесков. При увеличении количества подводимой энергии, система полностью избавляется от всплесков и остаются лишь ярко выраженные волны с постоянной амплитудой, длинной волны и повторяющейся формой. Хаотичность поверхности раздела уменьшается (уменьшается шероховатость поверхности волны). Таким образом, можно сказать, что получаемая на данном этапе поверхность (волны) создается в результате самоорганизации всплесков.

Предполагается, что из всех возможных способов самоорганизации поверхности раздела выбирается такой, для которого скорость преобразования подводимой механической энергии во внутреннюю энергию будет максимальной.

3. ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ ДЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ Cu–Ti И Cu–Ta

Вышеописанная схема эволюции поверхности раздела сформирована, в частности, на основании статей [9–14]. Ниже приведем некоторые ре-

зультаты для двухслойных композитов Cu–Ta и Cu–Ti. Это необходимо для проведения аналогии с многослойным композитом Cu–Ta. Не повторяя общей схемы эволюции поверхности раздела отметим некоторые особенности данных двухслойных композитов.

При формировании всплесков проявляется сложная, шероховатая структура. В [11] продольное сечение поверхности Cu–Ta и Cu–Ti используются для получения фрактальных размерностей соответствующих поверхностей разделов. Для соединения Cu–Ta была получена фрактальная размерность $D_{(CP)} = 1.68 \pm 0.07$, а для соединения Cu–Ti фрактальная размерность $D_{(2)} = 1.38 \pm 0.02$, $D_{(1')} = 1.32 \pm 0.03$ [13].

Также надо отметить интересную особенность, что при переходе от второго этапа к третьему (от всплесков к волнам) наблюдается квазиволновая поверхность: например, для соединения Cu–Ta переход всплески-волны реализуется на одном режиме, а в случае соединения Cu–Ti наблюдается прерывистая волна. Для соединения Cu–Ti фрактальная размерность квазиволновой поверхности $D_{(4)} = 1.18 \pm 0.02$ [13]. При переходе к третьему этапу (волнообразная граница) была получена фрактальная размерность $D_{(3)} = 1.14 \pm 0.02$ [13].

Важно отметить, что фрактальная размерность уменьшается при интенсификации режима сварки, что является важным выводом работы [13]. Этот вывод отражает тот факт, что нестационарное поведение поверхности раздела меняется на более устойчивое поведение.

Многослойный композит Cu–Ta

Режим (1). На рис. 1а показана поверхность тантала (медь вытравлена). Почти везде по поверхности реализована волнообразная граница (3-й этап), однако есть и некоторые особенности. Амплитуды волн в зоне “1” и “2” (выделены на рисунке) сильно отличаются. Между зонами происходит переход, когда волны из зоны “1” объединяются и формируют зону “2”. Это происходит в результате перераспределения энергии по поверхности образца. Также можно заметить, что в зоне “3” реализованы всплески, то есть 2-й этап. Таким образом по всей переходной зоне для режима (1) наблюдаются волны различной величины. Однако в некоторых местах появляются всплески, которые, проявляя коллективное поведение, объединяются в волны.

Режим (2). Для данной границы ситуация сходна с режимом (1). Поверхность волнообразная, периодический происходит переход от волны с меньшей амплитудой к волне обладающей большей амплитудой. В отличие от режима (1) здесь почти не наблюдается всплесков, однако можно заметить, что на поверхности волн иногда возни-

кает шероховатость (на рис. 1б выделены овалами). Интересно заметить, что частота появления шероховатости уменьшается при увеличении амплитуды волны.

Режим (3). При данном режиме на поверхности реализуется волнообразная граница, т.е. 3-й этап. Однако для данной переходной зоны чаще встречаются всплески (на рис. 1в выделены как “1”). Волны не переходят друг в друга (амплитуда волн почти везде одинаковая). Т.е. здесь в большей степени реализована ситуация перехода от второго этапа к третьему.

Режимы (4), (5). Так же как и в предыдущих случаях, граница – волнообразная. Единственное отличие: при режиме (5) примерно для 20% поверхности реализованы всплески (рис. 1г).

Таким образом, при режимах (1)–(5), мы наблюдали либо третий этап, либо переход от второго к третьему. Однако особый интерес представляет последний режим.

Режим (6). Эта переходная зона образуется при сцеплении предпоследней и последней (неподвижной) пластины, поэтому на нее приходится энергия всего верхнего пакета. Режим (6) обладает максимальной подводимой энергией, примерно в семь раз большей, чем все остальные. Отметим, что каждая новая пластина падала на следующую с добавлением некоторой неоднородности в распределении энергии по поверхности. Эта неоднородность росла с каждым новым шагом и на последней свариваемой поверхности раздела была максимальной. В результате поверхность при режиме (6) обладала большим градиентом распределения энергии. Это привело к тому, что при вытравливании меди наблюдались все возможные переходные состояния (рис. 2). На рисунке выделены зоны “0”–“4”, рельеф поверхности которых совершенно разный, однако он реализован на одном и тоже образце. Подобная ситуация может быть вредна с точки зрения сцепления сварного шва, но она крайне интересна с точки зрения изучения поведения поверхности раздела при различных внешних условиях. Рассмотрим режим (6) подробнее.

Зона “0” ранее нами не была учтена, здесь фактически нет никаких особенностей, поверхность гладкая, то есть на данном участке еще не начали проявлять себя процессы самоорганизации. Можно предположить, что причина такого поведения кроется в том, что на данных участках просто недостаточно подводимой энергии.

В зоне “1” начинают зарождаться выступы, при приближении к зоне “2” они растут и объединяются. Начинаются коллективные процессы.

В зоне “2” выступы активно объединяются в всплески, этот процесс усиливается с приближением к зоне “3”.

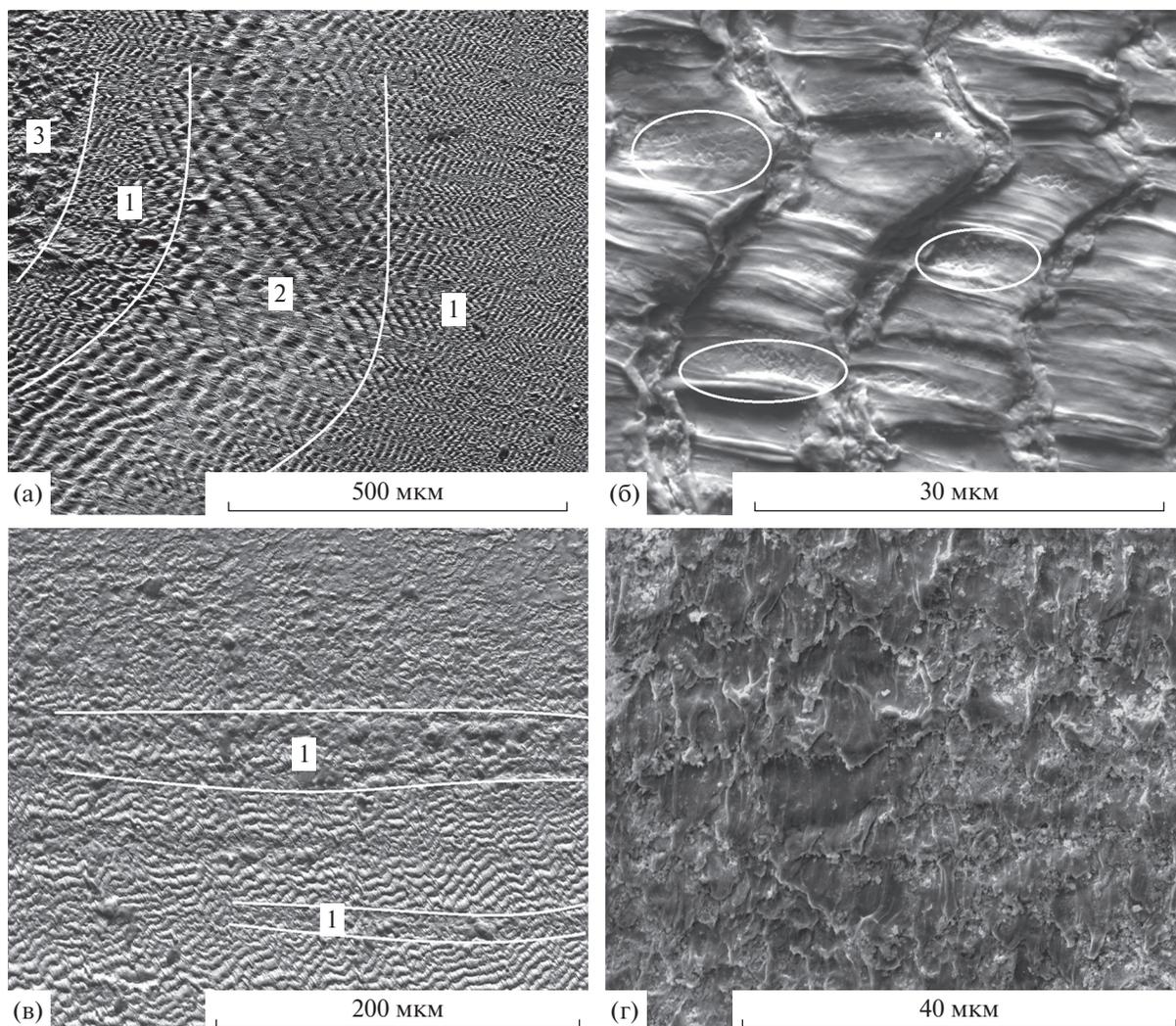


Рис. 1. Многослойный композит Cu–Ta, медь вытравлена: а – режим (1); б – режим (2); в – режим (3); г – режим (5).

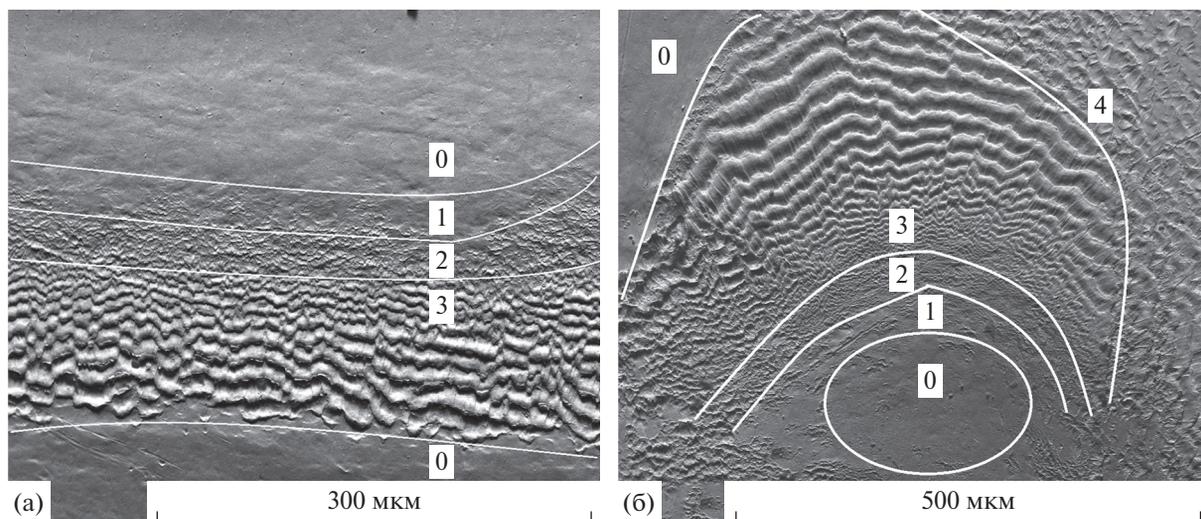


Рис. 2. Многослойный композит Cu–Ta, медь вытравлена: а, б – режим (6).

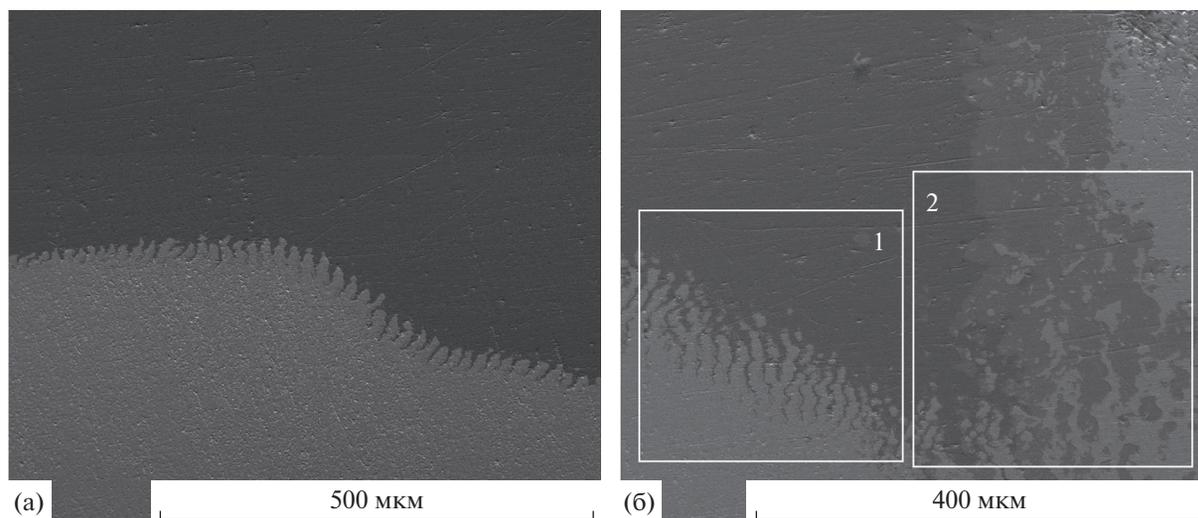


Рис. 3. Многослойный композит Cu–Ta, продольное сечение: а – режим (1); б – режим (6).

В зоне “3” из всплесков формируются волны. Надо отметить, что вблизи перехода зона “2–3” волны обладают небольшим периодом и амплитудой, но эти величины быстро растут при приближении к центру зоны “3”. Этот рост не заканчивается в центре и приходит к максимуму в конце зоны “3” (рис. 2). Интересно, что после этого следует резкий переход к зоне “0”, пропуская зоны “1” и “2”. Причина подобного поведения не совсем ясна.

В зоне “4” (рис. 2б) можно отметить отдельные волны, но они расположены хаотично. Здесь нет четкой структуры, которая наблюдается в зоне “3”. Амплитуды волн в зоне “4” сравнимы с амплитудами волн в зоне “3”, таким образом нельзя сказать, что здесь проявляются всплески. Можно предположить, что для данной зоны подводимая энергия была слишком высока и самоорганизация была нарушена.

На рис. 3 представлены продольные сечения для соединения Cu–Ta. С помощью них мы рассчитываем соответствующую фрактальную размерность. Так как режимы (1)–(5) схожи друг с другом, то и фрактальная размерность была рассчитана только для режима (1): $D = 1.28 \pm 0.01$ (рис. 3а). Этот результат соотносится с похожими данными для двухслойного композита Cu–Ta в случае волнообразной границы [10]. Однако для режима (6) фрактальная размерность меняется, в зависимости от того, на каком участке она измеряется (рис. 3б). В зоне, обозначенной цифрой “1”, $D = 1.26 \pm 0.02$; в зоне, обозначенной цифрой “2”, $D = 1.38 \pm 0.03$. Это согласуется с тем фактом, что при режиме (6) одновременно реализуется все этапы самоорганизации поверхности раздела. Таким образом поведение фрактальной размерности для данного образца соответствует нашей схе-

ме: при интенсификации режима сварки фрактальная размерность падает.

Обобщая все вышесказанное, можно отметить, что поведение многослойного сварного соединения Cu–Ta совпадает с предложенными в начале статьи этапами самоорганизации переходной зоны.

4. ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ ПРИ КРУЧЕНИИ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Рассмотрим, что происходит с многослойным композитом Cu–Ta, полученным сваркой взрывом, при сдвиге под высоким давлением – СПД (рис. 4).

При подобном сильном внешнем воздействии, мы подводим в наш образец большое количество внешней энергии. Однако, т.к. это совершенно иная форма сильного внешнего воздействия, то система стремится сначала уничтожить уже имеющуюся структуру (структуру, полученную благодаря самоорганизации поверхности раздела, протекающей при сварке взрывом), а затем создать новую (полученную благодаря кручению под высоким давлением).

Из многослойного композита, полученного сваркой взрывом (рис. 4а), переходим к ослаблению периодической структуры за счет кручения: рис. 4б (левый образец – угол поворота 180° , $P = 8$ ГПа, правый образец – угол поворота 360° , $P = 8$ ГПа). На рис. 4б также видно постепенное перемешивание слоев. Дальнейшее увеличение подводимой энергии (10 оборотов, $P = 8$ ГПа) приводит к полному уничтожению слоистости (рис. 4в); начинается активное перемешивание Cu и Ta. Возникает новая внутренняя структура:

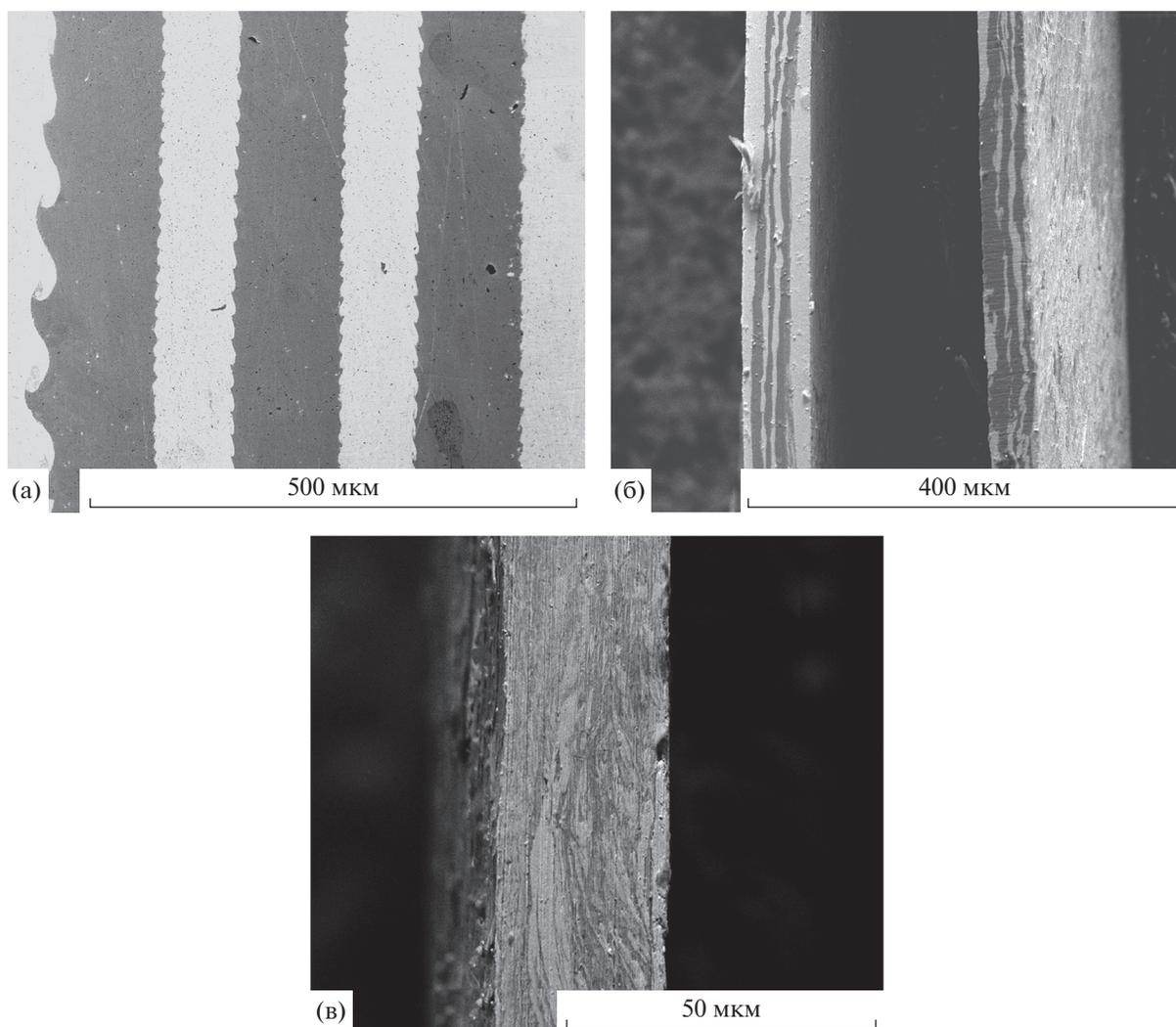


Рис. 4. Многослойный композит Cu–Ta, поперечное сечение: а – нет кручения и сжатия; б – СПД: угол поворота 180° и 360°, $P = 8$ ГПа; в – СПД: 10 оборотов, $P = 8$ ГПа.

вихри меди в тантале (рис. 4в). Однако можно ли подобное поведение системы также, как и для сварки взрывом, описать с помощью самоорганизации требует дальнейшего изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе, используя предыдущие результаты для двухслойных композитов (Cu–Ta и Cu–Ti), была сформулирована общая схема эволюции поверхности раздела при сварке взрывом: 1) Зарождение выступов и их рост. 2) Консолидация выступов и переход к всплескам. 3) Консолидация всплесков и переход к волнам.

Данная схема была апробирована на многослойном композите Cu–Ta. Выяснилось, что эволюция поверхности при режимах (1–6) соответствует приведенной выше закономерности. Также отмечено, что при режиме (6) наблюдаются

уникальные зоны раздела, которые дополняют общую схему изменения поверхности раздела.

Несмотря на схожесть поведения двухслойных композитов Cu–Ta, Cu–Ti и многослойного композита Cu–Ta, у этих пар были выявлены различия в диссипации энергии (особенности зон локального расплавления, особенности поведения фрактальной размерности).

Кручение под высоким давлением (как новое интенсивное внешнее воздействие) стремится уничтожить структуру, полученную благодаря самоорганизации поверхности раздела при сварке взрывом, а затем создать новую.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема “Давление” № 122021000032-5) при частичной поддержке РФФИ (проект № 20-42-660001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986. 431 с.
2. Иванов В.С., Корзинков А.В. Закономерности самоорганизации нано структур при интенсивной пластической деформации металлов и сплавов, а также при термическом испарении графита // Докл. РАН. 2002. Т. 384. № 6. С. 776–779.
3. Choukourou A., Melnichuk L., Gordeev I. Self-organization of vapor-deposited polyolefin at the solid/vacuum interface // Progress in Organic Coating. 2020. V. 143. P. 1–12.
4. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 512 с.
5. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1985. 412 с.
6. Кособоков М.С., Шур В.Я., Мингалиев Е.А., Авдошин С.В. Формирование само организованных нанодоменных структур в ниобате лития после импульсного нагрева инфракрасным лазером // ФММ. 2015. Т. 57. № 10. С. 1967–1971.
7. Li J.S., Raoelison R.N., Sapanathan T., Hou Y.L., Rachik M. Interface evolution during magnetic pulse welding under extremely high strain rate collision: mechanisms, thermomechanical kinetics and consequences // Acta Mater. 2020. V. 195. P. 404–415.
8. Бесшапошников Ю.П., Пай В.В., Петунин А.А., Чернухин В.И. О многослойном метании пластин скользящей детонационной волной // Изв. ВолгГТУ. 2018. Т. 211. № 11. С. 22–27.
9. Greenberg B.A., Ivanov M.A., Inozemtsev A.V., Kuz'min S.V., Lysak V.I., Vlasova A.M., Pushkin M.S. Interface Relief upon Explosion Welding: Splashes and Waves // Phys. Met. Metal. 2015. V. 116. P. 367–377.
10. Greenberg B.A., Ivanov M.A., Inozemtsev A.V., Kuz'min S.V., Lysak V.I., Pushkin M.S. Evolution of interface relief during explosive welding: Transitions from splashes to waves // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2015. V. 79. P. 1118–1121.
11. Гринберг Б.А., Иванов М.А., Иноземцев А.В., Пушкин М.С., Пацелов А.М., Слаутин О.В. Процессы самоорганизации и эволюции поверхности раздела при сварке взрывом (медь – тантал, медь – титан) // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2015. V. 12. P. 391–402.
12. Greenberg B.A., Ivanov M.A., Pushkin M.S., Inozemtsev A.V., Patselov A.M., Tankeyev A.P., Kuzmin S.V., Lysak V.I. Formation of Intermetallic Compounds During Explosive Welding // Metal. Mater. Trans. A. 2016. V. 47A. P. 5461–5473.
13. Pushkin M.S., Greenberg B.A., Ivanov M.A., Inozemtsev A.V., Patselov A.M., Beshaposhnikov Y.P. Microstructure of joints Cu–Ta, Cu–Ti, Cu–Cu, produced by means of explosive welding: fractal description of interface relief // Composite Interfaces. 2021. V. 28. P. 63–76.
14. Гринберг Б.А., Иванов М.А., Пушкин М.С., Пацелов А.М., Волкова А.Ю., Иноземцев А.В. Поверхность раздела при сварке взрывом: фрактальный анализ // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 10. P. 21–26.