УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-11-246-69-76

И. В. Сайков, канд. техн. наук, И. Б. Чудаков, канд. физ.-мат. наук, **Н. Л. Федотова***, с.н.с.**Н. М. Александрова*, д-р. техн. наук, Н. А. Полякова*, канд. физ.-мат. наук,**С. Ю. Макушев*, канд. физ.-мат. наук***ВЫСОКОДЕМПФИРУЮЩЕЕ СОСТОЯНИЕ В КОНСТРУКЦИОННЫХ БИМЕТАЛЛАХ,
ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ***ИСМАН им. А. Г. Мерджанова РАН, г. Черноголовка, revan.84@mail.ru*** ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина», г. Москва, i-chudakov@yandex.ru*

Исследованы композиционные двухслойные биметаллические материалы, состоящие из высококачественных сталей типа 30ХГСА и из высокодемпфирующих бинарных или легированных сплавов на основе системы Mn-Cu. Обсуждаются проблемы формирования высокодемпфирующего состояния в слоистых композиционных материалах, полученных сваркой взрывом. Показано, что достигнутое сочетание демпфирующих и прочностных свойств биметаллических композитов открывает реальную возможность их использования в промышленности.

Ключевые слова: сварка взрывом, сплавы высокого демпфирования, демпфирующая способность, механические свойства, сплавы Mn-Cu

I. V. Saikov, I. B. Chudakov, **N. L. Fedotova***, N. M. Alexandrova*, N. A. Polyakova*, S. Yu. Makushev****HIGH-DAMPING STATE IN STRUCTURAL BIMETALS OBTAINED BY EXPLOSION WELDING***Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS,**Chernogolovka, revan.84@mail.ru*** Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow, i-chudakov@yandex.ru*

Structural bimetallic materials consisting from high-strength steel (grade: 30HGSА) and binary (or alloyed) high-damping Mn-Cu alloys have been studied in the present research. Formation of the high-damping state in laminated materials obtained by explosion welding has been discussed. It is shown that the combination of high damping properties and high strength in the developed bimetallic materials provides an opportunity for practical application of high-damping bimetal in industry.

Keywords: explosion welding, high damping alloys, damping capacity, mechanical properties, Mn-Cu alloys

В последнее время значительное количество инженеров и исследователей пришло к выводу, что одним из наиболее эффективных способов снижения уровня шума и вибрации в механических и технических устройствах является применение в источнике вибрации конструкционных металлических материалов, обладающих сочетанием высокого уровня демпфирующей способности и высоких механических свойств.

Металлические демпфирующие материалы (называемые также сплавами высокого демпфирования или СВД) обладают рядом преимуществ перед неорганическими демпфирующими материалами: высокие значения модуля упругости, предела текучести и прочности, высокая эффективность работы в широком диапазоне рабочих температур и

рядом других. Однако большинство известных в настоящее время СВД уступают по своим механическим свойствам лучшим конструкционным сталям, что ограничивает их применение на практике. В связи с этим поиск путей повышения прочностных характеристик СВД (при сохранении приемлемой демпфирующей способности) рассматривается как приоритетное направление исследований.

Целью настоящего исследования явилась разработка слоистых композиционных металлических материалов, состоящих из металлической основы (изготовленной из высокодемпфирующего сплава) и высокопрочного поверхностного слоя (изготовленного из высококачественной конструкционной стали). Для обеспечения высокой адгезии

между двумя слоями композиционного материала была использована технология сварки взрывом [1].

Материалы и методика эксперимента

При выборе в качестве демпфирующей составляющей композиционного материала СВД на основе системы Mn-Cu учитывались следующие факторы: внешние статические напряжения практически не влияют на демпфирующую способность высокодемпфирующего сплава с 60% Mn и 40% Cu (везде используются массовые %) в области высоких и средних амплитуд колебаний, как это было показано в наших предыдущих исследованиях [2]. Дополнительно было установлено, что демпфирующие свойства сплава 60Mn-40Cu несколько увеличиваются в области малых амплитуд колебаний после приложения внешних статических напряжений [2]. Этот фактор очень важен для слоистых композиционных материалов из-за существенной разницы между коэффициентами теплового расширения компонентов биметалла.

Незначительное влияние внешних статических напряжений на демпфирующие характеристики сплава 60Mn-40Cu связано со специфическим характером структуры, образующейся при термоупругом мартенситном превращении [3, 4]. В сплавах Mn-Cu в процессе ГЦК-ГЦТ превращения формируется структура, характеризующаяся высоким уровнем внутренних напряжений, возникающих на границах тетрагональных доменов [3, 4], что и обуславливает слабую зависимость свойств материала от внешних статических напряжений, приложенных в упругой области.

Именно поэтому в качестве демпфирующей основы для биметаллического композита были использованы СВД на основе системы Mn-Cu (бинарный сплав 60Mn-40Cu и легированные 60Mn-37Cu-3Cr, 80Mn-15Cu-

2Ni-3Cr). Сплав 60Mn-40Cu обладает самыми высокими демпфирующими свойствами среди высокомарганцевых СВД этой системы. При увеличении концентрации Mn от 60 до 80% уровень демпфирования снижается.

Высокопрочная сталь марки 30ХГСА служила упрочненным поверхностным слоем композита. Выбор данной стали был обусловлен тем, что режимы термообработки этой стали и высокодемпфирующих сплавов системы Cu-Mn близки (температура закалки 800-830°C, температура отпуска 400-450°C), что позволяет проводить термообработку многослойного композиционного материала после сварки взрывом и реализовать высокий уровень свойств как в материале основы, так и в материале покрытия.

Эксперименты по получению двухслойного металлического композита методом сварки взрывом проводились по стандартной плоской схеме с параллельным расположением пластин. В качестве взрывчатого вещества использовался аммонит. Перед сваркой взрывом обе заготовки подвергались закалке и шлифовке. Исследуемые композиционные материалы формировались при ударных давлениях от $P=20,7$ ГПа до $P=11,2$ ГПа. Толщина основного материала (демпфирующего сплава) варьировалась от $t=2,4$ мм до $t=9$ мм, а толщина метаемой пластины (высокопрочного стального слоя) – от 1,2 до 1,5 мм.

После сварки взрывом изучалась кинетика изменения демпфирующих и механических свойств биметаллического материала при отжиге при температурах 400-450°C. Также контролировались адгезионные свойства полученного компаунда. Демпфирующие свойства композитов измерялись с помощью автоматизированной установки, собранной по схеме обратного изгибного маятника [5]. Исследовались амплитудные зависимости логарифмического декремента

колебаний δ при комнатной температуре. Демпфирующие характеристики анализировались в диапазоне амплитуд колебаний $\varepsilon = \Delta l / l = 0.01 - 2 \times 10^{-3}$. Структурное состояние композиционных материалов изучалось методом рентгеновской дифракции, а также с помощью электронной микроскопии.

Результаты и их обсуждение

Эксплуатационные характеристики любых биметаллических материалов определяются адгезионными характеристиками на поверхности раздела. В работе [6] на основании проведенного исследования было показано, что картина разрушения биметаллического образца после испытания на ударный изгиб является вязкой. На границе раздела двух материалов расслоение не происходит даже в зоне разрыва металла, как для образца сразу после сварки взрывом, так и для того же материала после дополнительного отжига при 400°C в течение 1 часа. Циклические испытания на изгиб также не выявили расслоения материала.

Твердость переходной зоны составляет 18 HRC сразу после взрыва и увеличивается до 28 HRC после отжига. Твердость поверхностного слоя достигает 50-52 HRC. Предел прочности поверхностного слоя превышает

1100 МПа. В то же время твердость демпфирующего компонента в максимальном демпфирующем состоянии составляет всего 5-6 HRC. Таким образом, используя сварку взрывом, можно обеспечить надежное поверхностное упрочнение СВД.

Установлено, что кинетика ГЦК-ГЦТ превращения в демпфирующем компоненте биметалла существенно отличается от кинетики, характерной для монолитного высокодемпфирующего сплава того же состава. На рис. 1 представлены данные об изменении степени тетрагональности сплава 60Mn-40Cu и биметалла на его основе в ходе отжига при $T = 400^\circ\text{C}$. Можно видеть, что степень тетрагональности демпфирующей составляющей композиционного материала при отжиге возрастает быстрее, чем у контрольного монолитного сплава.

Процесс формирования высокодемпфирующего состояния в монолитном сплаве носит стадийный характер, причем каждая стадия характеризуется своим типом структурного состояния материала. Электронно-микроскопическое исследование позволяет визуализировать 3 характерные стадии структурообразования в сплаве Mn-Cu (рис. 2-4).

Рис. 1. Изменение степени тетрагональности сплава 60Mn-40Cu (1) и биметалла на его основе (2) в процессе отжига при $T = 400^\circ\text{C}$

Рис. 2. Темнопольное электронно-микроскопическое изображение, полученное в рефлекс (002), двухфазной ГЦК+ГЦТ структуры сплава 60Mn-40Cu после отжига при $T=400^{\circ}\text{C}$ в течение 2 часов. Плоскость фольги {011}

В отличие от сплавов с классическим термоупругим мартенситным превращением, в сплавах Mn-Cu реализуется так называемое «наведенное» превращение, которому предшествует спинодальный распад γ -твердого раствора на области, обогащенные и обедненные Mn [7]. Когда в процессе отжига содержание Mn в богатых Mn областях достигает критического значения ($\sim 80\%\text{Mn}$), происходит локальное ГЦК-ГЦТ превращение (гранецентрированная кубическая решетка трансформируется в гранецентрированную тетрагональную). Таким образом, образуется двухфазная структура ГЦК+ГЦТ. Двухфазное состояние проявляется в виде появления на изображениях так

называемого «твидового» контраста (рис. 2).

Дальнейшее увеличение времени отжига приводит к распространению превращения (которое было инициировано в обогащенных Mn областях) на расстояния, превышающие длину волны модуляции состава при спинодальном распаде. Эту стадию можно интерпретировать как первый этап развития единой тетрагональной структуры. Микроструктура на этой стадии характеризуется наличием цилиндрических тетрагональных доменов, вытянутых вдоль направлений $\langle 110 \rangle$. Эти домены состоят из сотен зон, обогащенных и обедненных по Mn, но обладают одинаковой степенью тетрагональности. Характерной особенностью этой

Рис. 3. Темнопольное электронно-микроскопическое изображение структуры сплава 60Mn-40Cu, отожженного при 400°C в течение 8 часов (а) и схема сопряжения тетрагональных доменов, наблюдаемых в «паркетной» микроструктуре (б). Плоскость фольги {001}

микроструктуры, которую называют «паркетной», является наличие двух типов сопряжения тетрагональных доменов, имеющих либо взаимно-перпендикулярные, либо совпадающие направления осей «с» тетрагональных доменов (рис. 3). В такой структуре имеется высокая доля легкоподвижных двойниковых границ, не закрепленных дислокациями несоответствия. Сходную по морфологическим чертам микроструктуру авторы работы [8] наблюдали в сплавах системы Mn-Cu вблизи точки мартенситного превращения в экспериментах *insitu*, назвав ее структурой бороздок.

На поздних стадиях отжига формируется двойниковая микроструктура, типичная для ГЦК-ГЦТ превращения, которая обеспечивает максимальную релаксацию упругих напряжений (рис. 4). Характерной ее особенностью является иерархическое строение, в котором присутствуют двойники двух типов. Более крупные макродвойники содержат микродвойники (они же тетрагональные домены) двух из трех возможных (в ГЦТ структуре) ориентировок осей «с».

Каждой стадии структурообразования в сплаве соответствует свой уровень демпфирования и свой вид амплитудной зависимости демпфирующей способности. Типичные амплитудные зависимости величины логарифмического декремента колебаний спла-

ва с 60% Mn для различных стадий структурообразования в сплаве представлены на рис. 5, а. При выдержках 1-4 часа демпфирующая способность небиметаллического СВД слабо зависит от амплитуды колебаний, но с увеличением продолжительности отжига ее уровень возрастает. Ситуация кардинально меняется, когда время отжига увеличивается с 4 до 10 часов. Сильная амплитудная зависимость демпфирующей способности проявляется при всех амплитудах колебаний, а в области высоких амплитуд значения δ достигают 25%. При дальнейшем увеличении продолжительности отжига демпфирующая способность сплава несколько снижается, но сильная амплитудная зависимость сохраняется.

Анализ имеющихся данных показывает, что амплитудно-независимое затухание происходит на стадии существования двухфазной структуры, когда диссипация энергии обусловлена переориентацией осей «с» тетрагональных выделений в поле внешних упругих напряжений.

Электронно-микроскопические эффекты, связанные с процессами переориентации осей «с» тетрагональных выделений в двухфазных сплавах Mn-Cu, наблюдали авторы работы [9], назвав эти эффекты термином «flickering».

Заметное повышение уровня демпфиро-

Рис. 4. Светлопольное электронно-микроскопическое изображение структуры сплава 60Mn-40Cu, состаренного при 400°C в течение 16 часов. Плоскость фольги {011}

вания при средних и высоких амплитудах колебаний и соответствующее формирование сильной амплитудной зависимости демпфирующей способности происходит на стадии существования единой тетрагональной структуры. Диссипация энергии на этой стадии связана с гистерезисным движением границ тетрагональных доменов. Максимальные демпфирующие свойства реализуются на ранней стадии формирования единой тетрагональной структуры, где существует большое количество легко подвижных (слабо фиксированных) границ. Закрепление доменных границ дислокациями несоответствия и, соответственно, уменьшение демпфирующей способности происходят при переходе к классической двойниковой структуре.

Демпфирующая способность биметалла с демпфирующим компонентом из Mn-Cu сплава того же состава достигает своих максимальных значений уже через 2 часа отжига и при дальнейшем увеличении его продолжительности меняется незначительно (рис. 5, б). Кроме того, у биметалла практически отсутствует стадия амплитуднонезависимого демпфирования. Другими словами, процесс формирования единой тетрагональной структуры в демпфирующей со-

ставляющей биметалла протекает быстрее, чем в монолитном сплаве Mn-Cu. Отметим, что демпфирующая способность биметалла в области малых амплитуд колебаний почти не уступает соответствующим характеристикам монолитного Mn-Cu сплава.

Установлено, что демпфирующая способность биметалла достаточно слабо зависит от толщины демпфирующего слоя. Более того, демпфирующая способность биметаллов, изготовленных на основе СВД с существенно отличающимся уровнем демпфирования, практически не отличается. Сопоставим демпфирующие свойства биметалла на основе двойного сплава 60Mn-40Cu (рис. 5, а) и биметалла на основе высоколегированного сплава 80%Mn-15%Cu-2%Ni-3%Cr (рис. 6). Можно видеть, что уровень демпфирования этих биметаллов практически одинаков во всем исследуемом диапазоне амплитуд колебаний несмотря на то, что максимально достижимый уровень демпфирования для монолитного высокомарганцевого легированного сплава почти в 2 раза ниже, чем для бинарного сплава [3].

Характер амплитудной зависимости монолитных сплавов и биметаллов на стадии амплитуднозависимого демпфирования аналогичен: резкое увеличение δ в области

Рис. 5. Амплитудные зависимости логарифмического декремента колебаний для сплава 60Mn-40Cu (а) и биметалла на его основе (б) на разных стадиях отжига при $T=400^\circ\text{C}$

малых амплитуд и более плавное возрастание затухания в области средних и высоких амплитуд. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что в монолитных СВД и в композитах на их основе действует один и тот же механизм демпфирования. Максимальный уровень затухания реализуется на начальных этапах формирования единой тетрагональной структуры.

Отметим основные особенности формирования высокодемпфирующего состояния

температуры отжига. Уровень внешних растягивающих напряжений в демпфирующем компоненте на основе сплавов Mn-Cu достаточно высок из-за существенной разницы коэффициентов теплового расширения этого сплава и стали. Так, значения коэффициентов теплового расширения сплава Mn-Cu и стали 30ХГСА различаются в 2 раза ($22\text{-}26 \times 10^{-6} 1/\text{K}$ и $11\text{-}13 \times 10^{-6} 1/\text{K}$ соответственно) [10]. Известно, что температура мартенситного превращения возрастает под действи-

Рис. 6. Амплитудные зависимости логарифмического декремента колебаний для биметалла на основе легированного сплава 80%Mn-15%Cu-2%Ni-3%Cr на различных стадиях отжига при температуре $T=450^\circ\text{C}$

в биметаллах по сравнению с монолитными СВД. Прежде всего, это очевидное ускорение процесса формирования единой тетрагональной структуры в демпфирующей составляющей биметалла по сравнению с монолитным СВД, а также относительно высокий уровень демпфирования биметалла в области малых амплитуд колебаний.

При анализе процессов, происходящих в демпфирующей составляющей биметаллических сплавов, следует учитывать роль внешних растягивающих напряжений. Эти напряжения действуют в демпфирующей составляющей биметалла не только в условиях эксплуатации, но и определяют параметры мартенситного превращения, происходящего при охлаждении биметалла от

ем внешних напряжений [11, 12]. Учитывая бриллюэновский тип зависимости степени тетрагональности мартенситных кристаллов от температуры в сплавах Mn-Cu, это приводит к увеличению степени тетрагональности мартенсита при комнатной температуре и, соответственно, ускоряет процессы формирования единой тетрагональной структуры в сплавах Mn-Cu. Как следствие, наличие внешних растягивающих напряжений также благоприятно влияет на уровень демпфирующей способности биметалла в области малых амплитуд колебаний. Как следует из результатов, приведенных в работе [2], под действием внешних напряжений демпфирующая способность сплава 60Mn-40Cu возрастает (примерно на 20%) в

области малых амплитуд колебаний ($\varepsilon < 4 \times 10^{-4}$). В результате в области малых амплитуд колебаний уровень демпфирования в биметалле практически не уступает соответствующим характеристикам монолитного сплава ($\delta = 7$ и 12% , соответственно). Отметим, что это важно для практического применения материала в некоторых конкретных изделиях [13].

Максимальная демпфирующая способность высокодемпфирующего биметаллического сплава ($\delta \sim 20\%$) ниже, чем у монолитного СВД того же состава (где δ достигает $\sim 30\%$). Однако достигнутый уровень полностью соответствует требованиям, предъявляемым к вибро- и шумопоглощающим конструкционным материалам [14, 15].

Заключение

Высокопрочные биметаллические конструкционные материалы, обладающие высоким уровнем демпфирующей способности и высокими механическими свойствами, могут быть получены с использованием технологии сварки взрывом. В качестве демпфирующей основы биметалла рекомендуется использовать СВД на основе системы Mn-Cu с термоупругим мартенситным превращением. Поверхностное упрочнение может быть обеспечено толстым слоем высокопрочной конструкционной стали. Установлено, что плоские растягивающие напряжения, возникающие в демпфирующей составляющей биметалла, ускоряют формирование специфической мартенситной структуры с легкоподвижными границами тетрагональных доменов. Сочетание высокой демпфирующей способности и высокой прочности в полученных биметаллических материалах является перспективным для практического применения (по крайней мере, для инструментальной промышленности).

Библиографический список

1. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин – М.: "Машиностроение", 2005. – 544 с.
2. Влияние пластической деформации и асимметричного нагружения на демпфирование сплавов на основе Fe-Al и Mn-Cu. / И. Б. Чудаков, Н. М. Александрова, С. Ю. Макушев, Т. А. Турмамбеков // Сталь. – 2017. – №6. – С. 70-76.
3. Mechanism of formation of the damping properties of γ -Mn-Cu alloys with fct structure / V. A. Udovenko, Ye. Z. Vintaykin, V. B. Dmitriev, S. Yu. Makushev, N. A. Polyakova, E. Ya. Lyubimova, B. I. Shekalov // Physics of Metals and Metallography. – 1990. – Vol. 70. – Pp. 125-132.
4. Laddha, S. A review of physical metallurgy and damping characteristics of high damping Cu-Mn alloys. / S. Laddha, D. S. Van Aken // Mechanics and Mechanisms of Material Damping, Philadelphia, USA. – 1997. – Pp. 365-382.
5. Udovenko, V. A. Mechanism for the high damping state in alloys of the Fe-Al system. / V. A. Udovenko, I. B. Chudakov, N. A. Polyakova // Mechanics and Mechanisms of Material Damping, Philadelphia, USA. – 1997. – Pp. 204-213.
6. Physical nature of formation of high vibroabsorbing properties in laminated metallic materials / I. B. Chudakov, N. L. Fedotova, I. V. Saikov, N. A. Polyakova // Noise & Vibration, Saint-Petersburg. – 2019. – Pp. 733-738.
7. Винтайкин, Е. З. Спинодальный распад в сплавах марганец-медь. / Е. З. Винтайкин, В. Б. Дмитриев, В. А. Удовенко // Физика металлов и металловедение. – 1978. – №46. – С. 790-795.
8. Shumizu, R. Crystallographic and morphological studies on the FCC to FCT transformation in Mn-Cu alloys. / R. Shumizu, Y. Okumura, H. Kubo // Transactions of the Japan Institute of Metals. – 1982. – Vol. 23. – Pp. 53-59.
9. Farrkts, D. M. On the energetic of flickering contrast observed in TEM images of an aged Cu-Mn-Al damping alloys / D. M. Farrkts, T. I. Yamashita, G. Perkins // Acta Metallurgica et Materialia. – 1990. – Vol. 38. – Pp. 1883-1893.
10. Зубченко, Л. С. Марочник сталей и сплавов / Л. С. Зубченко, М. Н. Колосков – Машиностроение, 2003. – С. 585-786.
11. Реснина, Н. Н. Влияние напряжений на температурную кинетику мартенситных превращений и изменение деформации в сплавах памяти формы на основе никелида титана: диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. – СПбГУ. – 2003. – 102 с.
12. Матвеев, В. В. Сплавы высокого демпфирования на медной основе / В. В. Матвеев, Г. Я. Ярославский, В. С. Чайковский. – Киев: Наукова Думка, 1986. – 207 с.
13. Sugimoto, K. Industrial applications and prospects of damping alloys / K. Sugimoto // Kinzoku. – 1971. – Vol. 41. – Pp. 68-73.
14. Igata, N. Applications of high damping stainless alloy (HIDAS) / N. Igata // Key engineering materials. – 2006. – Vol. 319. – Pp. 209-216.
15. James, D.W. High damping metals for engineering application / D.W. James // Materials Science and Engineering. – 1969. – Vol. 4. – Pp. 1-8.