

ПРОЧНОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ МЕДИ М1 И СТАЛИ 20

© 2010 С.В. Гладковский, Т.А. Трунина, Е.А. Коковихин, С.В. Смирнова,
Д.И. Вичужанин

Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург

Поступила в редакцию 01.04.2010

Методом сварки взрывом получен трехслойный композит из низкоуглеродистой стали и меди. Исследованы особенности формирования механических свойств и строение изломов исходных материалов и композитов после сварки взрывом и последующей холодной прокатки.

Ключевые слова: *сварка взрывом, трехслойный композит, прочность*

Применение слоистых композитов из разнородных металлов в узлах конструкций, испытывающих действие повышенных нагрузок, температур и агрессивных сред, повышает их эксплуатационные характеристики. Областью рационального применения композитов «медь+сталь» может служить электрометаллургия, где в электроплавильных агрегатах эффективны композиты, сочетающие электро- и теплопроводность меди с прочностью стали [1]. Требуемые служебные показатели обеспечиваются созданием улучшенного комплекса физико-механических свойств композитов, которыми может не обладать каждый материал в отдельности. Свойства слоистых композитов, в свою очередь, определяются характером и закономерностями формирования структуры металлов, особенно в зоне их соединения. Одним из возможных методов получения многослойных металлических композитов может служить накопительная пакетная прокатка с соединением слоев (ARB-accumulative roll-bonding) [2, 3]. Этот метод является одним из разновидностей процессов интенсивной пластической деформации (ИПД), которые в настоящее время широко используются для создания материалов с микро-

и нанокристаллической структурой, обладающих уникальным комплексом физико-механических свойств. Однако для разнородных металлов и сплавов осуществление процесса соединения слоев представляет сложную технологическую задачу. В связи с этим для получения разнородных металлических композитов может быть использована технология сварки взрывом. Данный процесс обработки материалов характеризуется предельно высокими значениями таких технологических параметров как скорость соударения, давление при соударении, продолжительность процесса соединения металлов и др. [1]. По совокупности значений технологических параметров сварка взрывом сравнима по своему воздействию с процессами ИПД и может обеспечить уже на предварительной стадии обработки измельчение структуры и упрочнение металла заготовок. Дополнительное упрочнение сварного композита за счет измельчения структурных элементов в металлических слоях возможно путем последующей холодной прокатки.

Материал и методы исследований.

Для получения композитов использовали углеродистую сталь 20 и медь марки М1 (содержание меди не менее 99,9%) в виде горячекатаных листовых заготовок толщиной ≈ 2 мм. Сварку взрывом (взрывное плакирование) исходных заготовок разнородных металлических материалов осуществляли в ООО «Уралтехнопроект» (г. Екатеринбург). В результате сварки взрывом получены пластины трехслойного композита с толщиной слоев: Медь М1+Сталь 20+Медь М1 (1,83+1,96+1,91). Холодную прокатку с обжатием 50% и скоростью прокатки 0,2 м/с проводили на стане ДУО с диаметром валков

Гладковский Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией деформирования и разрушения. E-mail: gsv@imach.uran.ru

Трунина Татьяна Ароновна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. E-mail: trunina@imach.uran.ru

Коковихин Евгений Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Смирнова Светлана Валерьевна, аспирант

Вичужанин Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

255 мм при комнатной температуре. Размеры пластины после прокатки составляли 2,9x35,9x210 мм. Общая вытяжка заготовок соответствовала величине $\mu=2,0$, а истинная деформация $\epsilon=\ln\mu=0,7$.

Механические свойства исходных материалов и композитов определяли при испытаниях плоских образцов на одноосное растяжение при комнатной температуре по ГОСТ 1497-84 с применением универсальной испытательной машины Instron-8801. Значения ударной вязкости на образцах с V-образным надрезом (KCV) определяли при комнатной температуре на инструментированном маятниковом копре Tinius Olsen IT542M по ГОСТ 9454-78. Схема вырезки разрывных и ударных образцов из исходных заготовок, а также сварных и холоднодеформированных композитов обеспечивала одинаковую ориентацию оси образца по отношению к направлению прокатки. Боковая поверхность образцов была параллельна поверхности раздела слоев.

Структуру исходных материалов и композитов изучали металлографическим методом с помощью микроскопа NEOPHOT-21, микротвердость определяли на микротвердомере LEICA по шкале Виккерса. Замеры микротвердости проводили с шагом 0,05 мм.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты испытаний образцов на растяжение показали, что исходные листовые заготовки стали 20 (толщиной $h=5$ мм) и меди марки М1 (толщиной $h=2$ мм) характеризуются следующими значениями механических свойств:

- сталь 20 – $\sigma_B=495$ МПа, $\sigma_{0,2}=360$ МПа, $\delta=35\%$, $\Psi=49\%$;
- медь М1 – $\sigma_B=240$ МПа, $\sigma_{0,2}=110$ МПа, $\delta=56\%$, $\Psi=68\%$.

Свойства трехслойного сварного композита близки к свойствам центрального слоя стали 20: $\sigma_B=440$ МПа, $\sigma_{0,2}=385$ МПа, $\delta=42\%$, $\Psi=49\%$.

Холодная прокатка сварного композита с обжатием 50% приводит к росту прочностных свойств до уровня ($\sigma_B=530$ МПа, $\sigma_{0,2}=500$ МПа) при существенном снижении относительного удлинения и соизмеримой величине относительного сужения ($\delta=7\%$, $\Psi=57\%$).

Полученные данные свидетельствуют о том, что композит обладает улучшенным комплексом механических свойств по сравнению с исходными материалами: прочностные свойства композита близки по величине более прочному исходному материалу (стали), а пластические свойства сохраняются на достаточно высоком уровне. Анализ экспериментальных данных показывает, что вид кривых

растяжения стали 20, меди М1 и композита на их основе как после сварки взрывом, так и после дополнительной холодной прокатки существенно различаются (рис. 1, а-в).

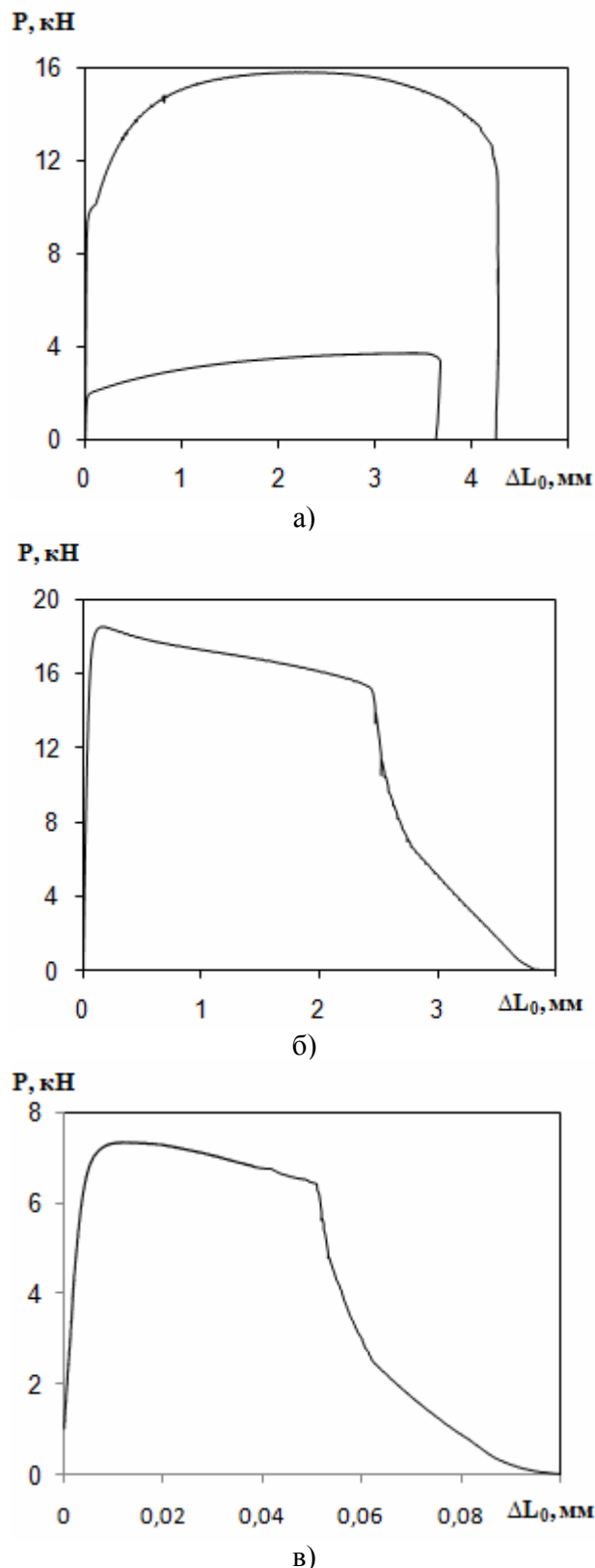


Рис. 1. Диаграммы растяжения: а) – стали 20 и меди М1; б) – композита после сварки взрывом; в) – композита после сварки взрывом и ХПД

Микрофотографии шлифов сварного шва «медь М1+Сталь 20» свидетельствуют о том, что в результате сварки взрывом образовалось неразъемное сварное соединение, граница которого имеет характерное «волнообразное» строение (рис. 2). Волнообразный характер поверхности сварного шва повышает прочность соединения слоев разнородных металлов [5]. Медь М1 в исходном состоянии содержит зерна α -фазы размером 10-100 мкм с выраженными двойниками. После образования композита сваркой взрывом структура меди практически не меняется, но размер зерна уменьшается до 5-50 мкм. Последующая холодная прокатка также не оказывает существенного влияния на структуру слоев меди. Структура стали 20 в сварном композите представляет собой феррит и мелкопластинчатый перлит при среднем размере зерна в пределах 10-70 мкм. Холодная прокатка композита приводит к более заметному измельчению структуры слоя стали 20. При этом перлитные колонии сильно искривляются. Деформация холодной прокаткой с обжатием 50% приводит к нарушению сплошности стали 20 и образованию микротрещин расслоения. Причиной появления последних, по-видимому, следует считать наличие в стали значительной доли неметаллических включений различного рода.

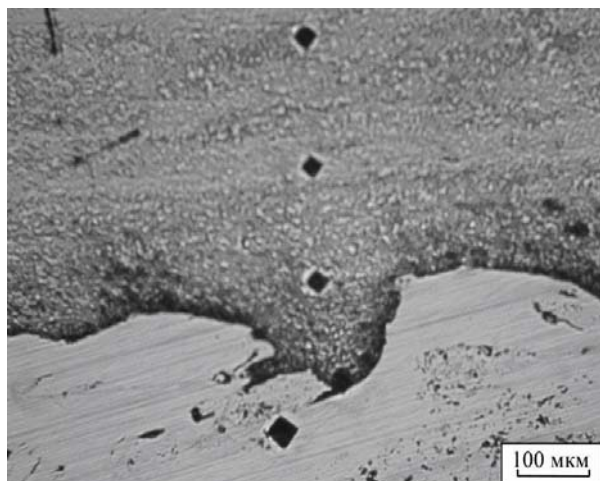


Рис. 2. Зона соединения стали 20 (верх) и меди М1 (низ) после сварки взрывом

Микротвердость исходных образцов из листа меди М1 и стали 20 составляет соответственно $HV=125$ кгс/мм² и $HV=171$ кгс/мм². После сварки взрывом и образования композита микротвердость меди практически не изменилась (~ 125 кгс/мм²), а стали – существенно повысилась (~ 230 кгс/мм²). Оцениваемое по приросту величины ΔHV деформационное упрочнение после прокатки для центрального

слоя стали 20 также оказывается более значительным ($\Delta HV \approx$ до 90 кгс/мм²), чем для меди ($\Delta HV \approx$ до 25 кгс/мм²). Полученные данные (рис. 3) свидетельствуют о более ускоренном исчерпании запаса пластичности стали по сравнению с медью в структуре композита в процессе прокатки, чем также объясняется появление микротрещин в слое стали 20.

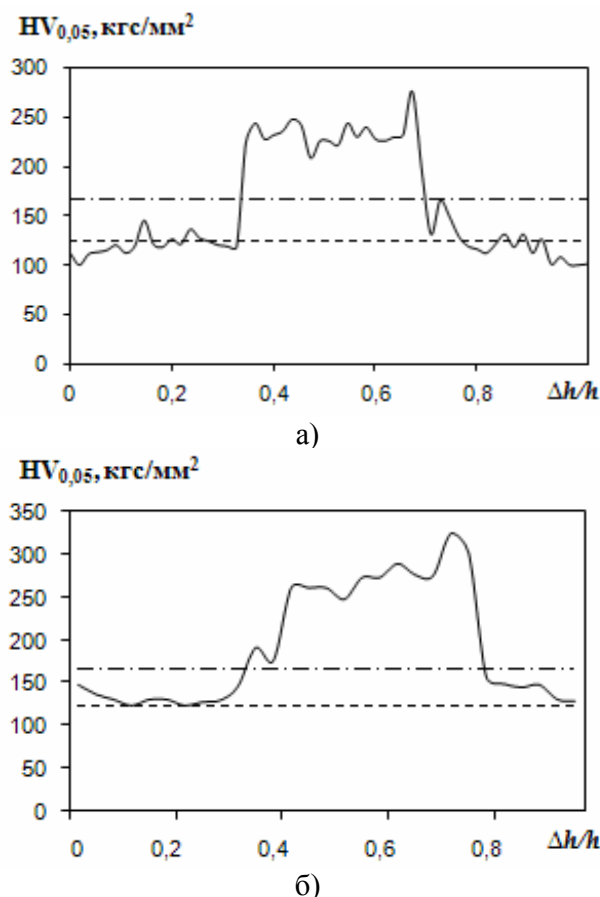


Рис.3. Распределение микротвердости по ече-нию композита «медь М1+Ст 20+ медь М1»: а) – после сварки взрывом (исходная толщина 5,7 мм); б) - после дополнительной холодной прокатки с обжатием $\sim 50\%$ (----М1 исходное состояние; -.-.-Ст 20 исходное состояние; _____ композит М1-Ст20-М1)

Изучены особенности разрушения стального и медных слоев в сварном композите после испытаний на ударный изгиб и в холоднокатаном композите после испытаний на растяжение при комнатной температуре. Микрофрактографический анализ, проведенный с помощью сканирующего растрового микроскопа Tescan VEGA II XMU, позволил установить, что в сварном композите разрушение путем отрыва формирует в медном сплаве почти бесструктурные участки рельефа, но с хорошо выраженными вязкими ямками (рис. 4а). Заметное скопление ямок наблюдается на границе сварного шва, что свидетельствует о повышении энергоемкости процесса разрушения

на этом участке (рис. 4б). Продольные участки микрорасслоения в стальном слое, сформированные в процессе изготовления исходного листа стали 20 методом прокатки, можно наблюдать в верхней части микрофрактограммы (рис. 4в). Анализ особенностей микростроения излома ударного образца позволяет установить, что последующая холодная прокатка со степенью обжатия 50% усиливает развитие микрорасслоения в стальном слое, которое сопровождается появлением мелких трещин (рис.4б). Эволюция особенностей разрушения в слое стали 20 после прокатки композита свидетельствует о постепенном исчерпании способности материала к дальнейшему пластическому деформированию. Общий характер разрушения слоя стали 20 в разрывном и ударном образцах носит вязкий ямочный характер.

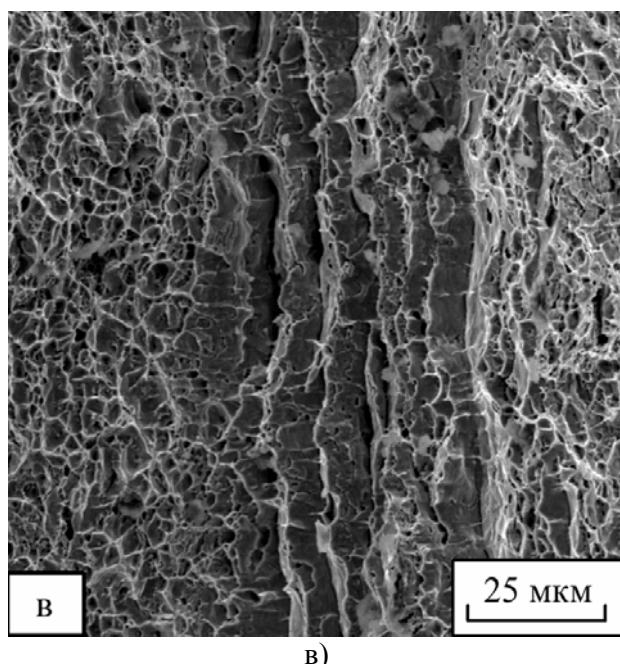
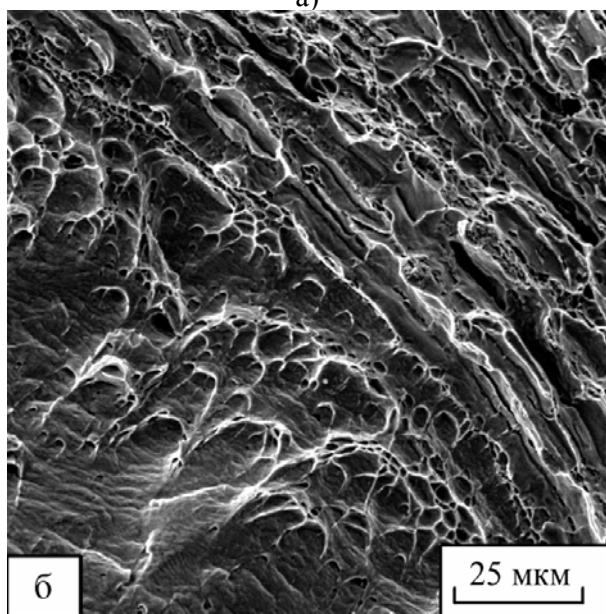
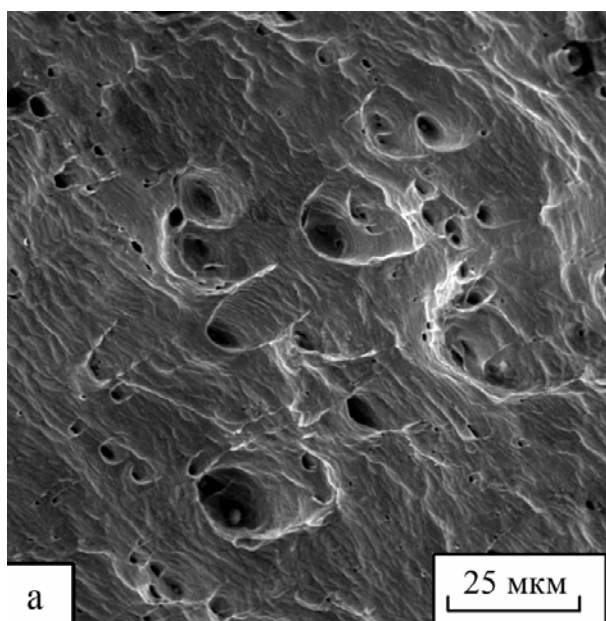


Рис. 4. Микростроение поверхности разрушения слоев в разрывном (а, б) и ударном (в) образцах: а – слой меди М1; б – зона сварного шва слоев меди М1 и стали 20; в – слой стали 20

Полученные при комнатной температуре значения ударной вязкости композита при ориентации линии надреза параллельно границе раздела слоев ($KCV=1,35$ МДж/м²) выше значений, характерных для стали 20 ($KCV=0,85$ МДж/м²) и меди М1 ($KCV=1,27$ МДж/м²), по-видимому, это связано с возможной релаксацией напряжений при вхождении трещины в новый слой [4].

Выводы:

1. С использованием комбинированной технологии, включающей сварку взрывом и последующую холодную прокатку, получен трехслойный металлический композит «Медь М1-Сталь 20-Медь М1», обладающий более высоким комплексом механических свойств по сравнению с исходными материалами.

2. Процесс деформационного упрочнения композита при сварке взрывом и последующей холодной прокатки в медных и стальных слоях развивается неравномерно: более высокая интенсивность деформационного упрочнения характерна для центрального слоя стали 20.

3. Накопление поврежденности в слое стали 20 в виде трещин расслоения при высоких степенях деформации свидетельствует об ограниченном резерве деформационного упрочнения композита при комнатной температуре.

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении экспериментов сотрудникам ИМАШ УрО РАН: аспиранту Голубковой И.А., инженеру Бородину Е.М и к.т.н. Савраю Р.А.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы Президиума РАН № 22 (проект № 09-П-1-1008) и Гранта РФФИ-Урал (проект № 10-02-96041).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Оголихин, В.М. Исследование и создание слоистых металлических композиционных материалов для электрометаллургического оборудования: автореф. дис. ... д-ра.техн. наук. – Новосибирск, 2008. – 35 с.
2. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
3. Карпов, М.И. Анизотропия плотности сверхпроводящего критического тока в слоистых наноструктурных композитах, содержащих слои сплава Nb - 50% Ti / М.И. Карпов, В.П. Коржов, В.И. Внуков и др. // Материаловедение. – 2008. - №6. – С. 35-39.
4. Трыков, Ю.П. Деформация слоистых композитов / Ю.П. Трыков, В.Г. Шморгул, Л.М. Гуревич. – Волгоград: ВолГТУ, 2001. – 242 с.
5. Дерibas, А.А. Физика упрочнения и сварка взрывом: 2-е изд., доп. и перераб. – Новосибирск: Наука, 1980. – 220 с.

DURABILITY AND DESTRUCTION OF THE METAL COMPOSITE ON THE BASIS OF COPPER M1 AND STEEL 20

© 2010 S.V. Gladkovsky, T.A. Trunina, E.A. Kokovihin, S.V. Smirnova,
D.I. Vichuzhanin

Institute of Machinery Science UB RAS, Ekaterinburg

The method of explosion welding receives a three-layer composite from low-carbon steel and copper. Features of formation the mechanical properties and a structure of fractures of initial materials and composites after explosion welding and by subsequent cold rolling are investigated.

Key words: *explosion welding, three-layer composite, durability*

*Sergey Gladkovsky, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Chief of the Laboratory of Deformation and Destruction. E-mail:
gsv@imach.uran.ru*

*Tatiana Trunina, Candidate of Technical Sciences, Senior
Research Fellow. E-mail: trunina@imach.uran.ru*

*Evgeniy Kokovihin, Candidate of Technical Sciences, Senior
Research Fellow*

Svetlana Smirnova, Post-graduate Student

*Dmitriy Vichuzhanin, Candidate of Technical Sciences, Senior
Research Fellow*