

MECHANICAL PROPERTIES AND FRACTURE BEHAVIOR OF THE "COPPER M1 – STEEL 09G2S" BIMETAL PRODUCED BY EXPLOSION WELDING

I. A. Veretennikova*, D. I. Vichuzhanin, N. S. Michurov, S. V. Smirnov

Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, Russian Federation

*Corresponding author. E-mail: irincha@imach.uran.ru; address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, 620049, Ekaterinburg, Russian Federation. Tel.: +7 (343) 375 35 96; fax: +7 (343) 374 53 30

The paper studies the mechanical properties of the "copper M1 – steel 09G2S" bimetal obtained by explosion welding. The features of the fracture of the welded joint after mechanical tests are considered.

Keywords: multilayer metal, explosive welding, strength, fracture.

DOI: 10.17804/2410-9908.2016.6.028–038

References

1. Deribas A.A. *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom* [The Physics of Explosive Hardening and Welding]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980, 220 p. (In Russian).

2. Lysak V.I., Kuzmin S.V. *Svarka vzryvom* [Explosion Welding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, 543 p. (In Russian).

3. Kobelev A.G., Lysak V.I., Chernyshev V.N. *Proizvodstvo sloistykh kompozitsionnykh materialov* [Production of Layered Composite Materials]. Moscow, Intermet Inzhiniring Publ., 2002, 496 p. (In Russian).

4. Findik F. Recent developments in explosive welding. *Material and Design*, 2011, vol. 32, iss. 3, pp. 1081–1093. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.10.017.

5. Olson D.L., Siewert T.A., Liu S., Edwards G.R. *ASM Handbook*. Volume 6. Welding, Brazing, and Soldering. ASM International, 1993, 1299 p.

6. Rybin V.V., Ushanova Je.A., Kuz'min S.V., Lysak V.I. Explosively welded materials bond zone: Morphology and crystallography. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2012, vol. 31, no. 1, pp. 74–77.

7. Smirnov S.V., Veretennikova I.A., Vichuzhanin D.I. Modeling of delamination in multilayer metals produced by explosive welding under plastic deformation. *Computational Continuum Mechanics*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 398–411. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.4.38. (In Russian).

8. Gladkovsky S.V., Trunina T.A., Kokovikhin E.A., Smirnova S.V., Vichuzhanin D.I. Strength and fracture of a metal composite based on copper M1 and steel 20. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2010, vol. 12, no. 1 (2), pp. 321–325. (In Russian).

9. Gladkovsky S.V., Trunina T.A., Kokovikhin E.A., Smirnova S.V., Kamantsev I.S., Borodin E.M. Mechanical properties and structure of layered steel-aluminum composites based on the 09G2S steel produced by pack rolling. *Proizvodstvo prokata*, 2012, no. 4, pp. 32–37. (In Russian).

10. Oliver W.C., Phar G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journals of Materials Research*, 1992, vol. 7, iss. 06, pp. 1564–1583. DOI: 10.1557/JMR.1992.1564.

11. Smirnov S.V., Veretennikova I.A., Kamantsev I.S., Trushina E.B. Studying the fracture of the interface between the layers in a "Steel 08Kh18N10T + Steel 10" bimetal strip, produced by explosive welding, under rolling. *Proizvodstvo prokata*, 2014, no. 7, pp. 14–19. (In Russian).



12. Smirnov S.V., Veretennikova I.A. Anisotropy of the mechanical properties of a "08Cr18Ni10Ti steel – St10 steel" bimetal strip produced by explosion welding. *Proizvodstvo prokata*, 2017, no. 1, pp. 30–36. (In Russian).

13. Smirnov S.V., Shveikin V.P. *Plastichnost i deformiruemost uglerodistoy stali* [Plasticity and Deformability of Carbon Steel]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2008, 256 p. (In Russian).

14. Zolotorevsky V.S. *Mekhanicheskie svoystva metallov* [Mechanical Properties of Metals]. Moscow, MISIS Publ., 1998, 400 p. (In Russian).

15. Veretennikova I.A., Konovalov D.A., Smirnov S.V. Patterns of the change in the mechanical properties of a bimetallic welded joint under plastic deformation. *AIP Conf. Proc.*, 2016, vol. 1785, iss. 1, pp. 040089. DOI: 10.1063/1.4967146.

16. Grinberg B.A., Ivanov M.A., Rybin V.V., Kuzmin S.V., Lysak V.I., Elkina O.A., Patselov A.M., Antonova O.V., Inozemtsev A.V., Volkova A.Yu., Plotnikov A.V. Dissipative structures in explosion welding. *Izvestiya VolgGTU*, 2012, no. 14 (101), pp. 27–43. (In Russian).



Подана в журнал: 29.11.2016 УДК 621.791.13 DOI: 10.17804/2410-9908.2016.6.028–038

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ БИМЕТАЛЛА «МЕДЬ М1 – СТАЛЬ 09Г2С», ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

И. А. Веретенникова*, Д. И. Вичужанин, Н. С. Мичуров, С. В.Смирнов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, Российская Федерация

*Ответственный автор. Электронная почта: irincha@imach.uran.ru; Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, 620049, Екатеринбург, Российская Федерация. Телефон: +7 (343) 375–35–96; факс: 374–53–30

В работе исследованы основные механические свойства биметалла «медь М1 – сталь 09Г2С», полученного сваркой взрывом. Рассмотрены особенности разрушения сварного шва и строение изломов после механических испытаний.

Ключевые слова: биметалл, сварка взрывом, прочность, разрушение.

1. Введение

Важная роль при создании новых материалов со специальными свойствами принадлежит слоистым металлическим композициям, способным совмещать комплекс уникальных свойств, таких как высокая прочность, коррозионная стойкость, электро- и теплопроводность, жаропрочность, износостойкость и другие. Кроме того, применение биметаллов позволяет не только повысить надежность и долговечность большого класса деталей и оборудования, но и значительно сократить расходы на их изготовление в результате экономии дорогостоящих цветных металлов. Использование слоистых металлов способствует разработке более совершенных конструктивных решений при создании современных машин, приборов, аппаратов. Такие материалы представляют собой монолитную композицию, сохраняющую надежную связь составляющих при дальнейшей технологической обработке и в условиях эксплуатации. Одним из надежных и проверенных способов соединения металлов является сварка взрывом [1–7]. Сварку взрывом используют для изготовления многослойных листов, полос, цилиндрических изделий, которые в дальнейшем могут подвергаться обработке давлением (прокатке, прессованию, штамповке, волочению и др.) [2]. Однако, несмотря на высокую техническую и экономическую эффективность применения биметаллических материалов и изделий их производство не так широко. Это во многом связано с недостатками существующих технологических процессов производства биметалла, которые в ряде случаев не позволяют получить биметаллы требуемого качества, что в свою очередь является следствием наличия неполной информации о процессе соединения, формоизменении и изменении свойств металлических композиций при их изготовлении, обработке и применении.

Цель данной работы – оценка механических свойств биметалла «медь М1 – сталь 09Г2С», полученного сваркой взрывом, а также характера разрушения сварного шва и строения изломов после механических испытаний [7].

2. Материалы и методы исследований

Для получения биметалла использовали металлические листы из конструкционной низколегированной стали 09Г2С и меди марки М1. Химический состав исходных материалов приведен в табл. 1 и 2. Сталь 09Г2С применяется при производстве металлопроката для



различных деталей и элементов сварных металлоконструкций, работающих при температуре от -70 до +425 °C под давлением. Медь М1 обладает высокими антикоррозийными свойствами как при нормальных атмосферных условиях, так в пресной и морской воде и других агрессивных средах. Выбор материалов для исследования обусловлен их широким применением в промышленности [8, 9], а также данное (их) сочетание перспективно для применения в судостроение, машиностроение, в качестве материала для арматуры, теплообменных аппаратов и др. Лист «медь М1 – сталь 09Г2С» толщиной 6 мм был изготовлен методом сварки взрывом из листов толщиной 2 мм (медь М1) и 4 мм (сталь 09Г2С). Сварка взрывом осуществлена на предприятии «Уралтехнопроект» (г. Екатеринбург) по оптимальной технологии, обеспечивающей отсутствие дефектов в виде вмятин, расслоений и нарушений геометрической формы.

1 аолица 1 – Химическии состав меди М1, содержание элементов в ⁹	T	аблица 1	– Хим	ический о	состав	меди М1.	соде	ржание	элементов	В	%
---	---	----------	-------	-----------	--------	----------	------	--------	-----------	---	---

Fe	Ni	S	As	Pb	Sb	Bi	Sn	Ag	Cu
0,002	0,0014	0,004	0,002	0,002	0,0012	0,001	0,002	0,002	99,9

Таблица 2 – Химический состав стали 09Г2С, содержание элементов в %

С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ni	Cu	Со
0,116	0,69	1,48	0,019	0,01	0,058	0,032	0,059	0,0079

Эксперименты проведены на оборудовании в Центре коллективного пользования «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН (г. Екатеринбург). Механические свойства исходных материалов и композита определяли при испытаниях плоских образцов на одноосное растяжение при комнатной температуре по ГОСТ 1497–84 с применением универсальной испытательной машины Instron-8801. Структуру, распределение элементов, локальный химический состав материалов сварного шва и прилегающих к нему зон исследовали методами оптической металлографии (микроскоп NEOPHOT 21) и с помощью растрового электронного микроскопа TESCAN VEGA II XMU. Исследование распределения микротвердости на поперечных шлифах осуществляли с использованием наномеханического комплекса Nano-Triboindentor TI 950, где твердость определяется по методике Оливера – Фарра [10].

3. Результаты и их обсуждение

В результате сварки взрывом биметалл «медь М1 – сталь 09Г2С» представляет собой неразъемное сварное соединение, граница которого имеет характерное «волнообразное» строение (рис. 1) [11]. В различных моделях, описывающих среду как несжимаемую жид-кость, волнообразование, согласно общепринятой точке зрения, связано с разными формами гидродинамической неустойчивости [1, 2]. Данные по распределению меди и железа (рис. 2), полученные на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA II XMU, свидетельствуют о малой протяженности диффузионной зоны на границе сварного шва и наличии области резкого концентрационного перехода.

В результате испытаний на растяжение плоских образцов, вырезанных из исходных заготовок стали 09Г2С, меди М1 и листа «медь М1 – сталь 09Г2С» вдоль сварного шва, получены кривые сопротивления деформации (рис. 3) и основные механические характеристики материалов (табл. 3).



Рис. 1. Общий вид волнового профиля на границы раздела в биметалле «медь М1 – сталь 09Г2С»



Рис. 2. Распределение химических элементов по поперечному сечению шва



Рис. 3. Кривые сопротивления деформации материалов в исходном состоянии и биметалла после сварки взрывом: а – начальный участок, б – полная диаграмма деформации

т иолици 5	Mexanin leekile ebonerba marephatob				
Образец	σ _{0,2} , МПа	σ _В , МПа	δ, %	ψ, %	
Медь М1	100	235	53	47	
Сталь 09Г2С	380	505	38	45	
«Медь М1 – сталь 09Г2С»	460	475	14	36	

Таблица 3 – Механические свойства материалов

Обозначения: $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; σ_B – предел прочности; δ – относительное удлинение после разрыва; ψ – относительное сужение после разрыва.

Важными составляющими конструкционной прочности являются прочностные (условный предел текучести, предел прочности) и пластические (относительное удлинение и сужение после разрыва) характеристики.

Установлено, что полученный композит имеет значение условного предела текучести на 80 МПа выше по сравнению с наиболее прочным материалом соединения – сталью 09Г2С. В то же время предел прочности композита на 30 МПа ниже, чем предел прочности стали 09Г2С. Пластические свойства для биметалла значительно ниже, чем пластические свойства исходных материалов. Аналогичные закономерности по механическим свойствам были получены в работе [12]. Данный факт объясняется тем, что в процессе сварки взрывом в биметаллическом образце образуется упрочненный слой, что подтверждается данными распределения микротвердости на рис. 4 и [15]. Слой включает в себя непосредственно сварной шов и прилегающие к нему зоны, ресурс пластичности которых уже частично исчерпан в процессе образования сварного соединения. Стоит заметить, что относительное удлинение 14 % для конструкционного материала это очень хорошо. Например, для авиационых конструкционных материалов удлинение должно быть не менее 5 % [13, 14]. Таким образом, прочностные характеристики композита находятся на уровне самой прочной составляющей в композите. По пластическим характеристикам композит и уровне самой прочной составляющей в композите.

Для определения микротвердости упрочненного слоя в области сварного шва использовали данные, полученные при индентировании с максимальной нагрузкой 500 мН и шагом индентирования 0,1 мм, что обеспечивало отсутствие влияния соседних уколов индентора на результаты испытаний. Измерения проводились в направлении, перпендикулярном сварному шву вдоль линий сканирования по поперечному сечению образца. Ширина области измерений составляла 6 мм. По результатам испытаний было построено поле распределения микротвердости в поперечном сечении биметаллической полосы в области сварного шва и примыкающих к нему участков каждого из слоев (рис. 4). Значительный объем экспериментальных данных позволил определить размеры околошовной зоны, в которой механические свойства отличаются от свойств металлов слоев композита, а также оценить степень их деформационного упрочнения.



Рис. 4. Карта распределения микротвердости в области сварного шва по поперечному сечению биметаллической полосы «медь М1 – сталь 09Г2С» (черными линиями указаны границы околошовной зоны)

Распределение микротвердости для биметалла после сварки взрывом выявило неравномерное упрочнение материалов в области сварного шва (рис. 4). Вблизи границы соединения слоев образовалась зона максимального упрочнения шириной около 0,5 мм. Распределение микротвердости в области сварного шва повторяет волнообразный характер границы соединения слоев. Микротвердоств в этой области выше микротвердости для составляющих биметалла.

Veretennikova I.A. et al. / Mechanical properties and fracture behavior of the "copper M1 – steel 09G2S" bimetal produced by explosion welding

http://dream-journal.org



Так микротвердость участков сталей 09Г2С и меди М1, находящихся вдали от околошовной зоны, составляет 3-4 ГПа и 1-2 ГПа соответственно. В слое из стали 09Г2С наблюдается понижение микротвердости в направлении от сварного шва к краю биметалла, что скорее всего обусловлено механическими свойствами исходного листа, примененного для изготовления биметалла. В интенсивно деформированной области стали 09Г2С, прилегающей к сварному шву, наблюдается увеличение уровня микротвердости до 6 ГПа. Микротвердость сварного шва варьируется от

2 ГПа на границе с медью до 6 ГПа на локальных участках в центральной области шва. Столь высокие значения микротвердости являются следствием интенсивной локальной пластической деформации происходящей во время взрывного сваривания.

Детальное исследование сварного шва было проведено с использованием электронносканирующего микроскопа. Было выявлено большое количество зон интенсивного перемешивания меди с железом (рис. 5).



Рис. 5. Зоны сварного шва биметалла «медь М1 – сталь 09Г2С»: *а*-*в* – участки перемешивания меди с железом; г – химический анализ зоны, приведенной на рис. 5 в

Перемешивание происходит в результате прохождения взрывной волны за счет большой пластической деформации, трения поверхностей, направления и скорости кумулятивной струи и других факторов. В работе [16] для такого перемешивания использовали термин фрагментация типа дробления (ФТД). ФТД представляет собой процесс разделения на частицы, которые либо разлетаются, либо стыкуются друг с другом. ФТД представляет собой быстротечный процесс, который успевает произойти за время взрыва. В области ФТД вылетают частицы произвольной формы, при этом остается фрагментированный слой, прилегающий к границе соединения. Данный факт особенно хорошо виден на рис. 5 г, где субмикронные частицы железа произвольной формы обнаруживаются в соседних областях меди.

Температура в зоне контакта при сварке взрывом может быть достаточно высокой, но при столь быстротечном воздействии протекание термоактивированных процессов не представляется возможным. Можно полагать [16], что эти процессы, как и диффузия, становятся возможными лишь при остаточных температурах и напряжениях, и вероятнее всего определяют наличие на сварной границе фрагментов узкой зоны оплавления (рис. 6 *a*, δ).

Исследование микротвердости фрагментированных областей, прилегающих к границе (рис. 6 *в*, *г*) выявило пониженную микротвердость по сравнению со сталью 09Г2С и медью М1. Так при нагружении глубина внедрения для зоны перемешивания больше, чем для меди М1 и стали 09Г2С (рис. 6 *г*), в соответствии с чем микротвердость этой зоны ниже, чем для твердость данных материалов [10], однако не на много отличается от твердости меди М1.





Микрофрактографический анализ поверхностей излома на образцах биметалла «медь M1 – сталь 09Г2С» после растяжения при комнатной температуре (рис. 7 *a*) показал, что разрушения слоя стали 09Г2С в сварном композите носит вязкий ямочный характер (рис. 7 δ). Помимо этого в стальном слое наблюдаются продольные участки микрорасслоения, сформированные в процессе изготовления исходного листа стали 09Г2С методом прокатки (рис. 7 *a*). В меди разрушение путем отрыва формирует почти бесструктурные участки рельефа, но с хорошо выраженными вязки-

Veretennikova I.A. et al. / Mechanical properties and fracture behavior of the "copper M1 – steel 09G2S" bimetal produced by explosion welding

http://dream-journal.org



ми ямками (рис. 7 б). Заметное скопление ямок наблюдается на границе сварного шва, что свидетельствует о повышении энергоемкости процесса разрушения на этом участке (рис. 7 г).



а



EM HY:15.00 KV SEM MAG:2.00 KX [______] VEGA((TESCA) C: 12 View field:103.8 µm 20 µm et:SE SM: RESOLUTION ИМАШ УрО РАН И







Рис.7. Микростроение поверхности разрушения слоев в разрывном образце «медь М1 – сталь 09Г2С»: *а* – общий вид разрывного образца; *б* – слой стали 09Г2С; *в*–*г* – зона сварного шва биметалла «медь М1 – сталь 09Г2С»; *д* – рост трещины в сталь 09Г2С перпендикулярно сварному шва биметалла «медь М1 – сталь 09Г2С»

36



При растяжении биметалла разрыв происходит за счет отрыва по основным составляющим материалам и по сварному шву. В области сварного шва наблюдаются участки расслоения (рис. 7 e), в направлении перпендикулярном приложенной нагрузке, а так же области, где сварной шов остается прочно соединенным (рис. 7 e). Кроме того, наблюдаются участки, где трещины со сварной границы начинают распространяться в сталь 09Г2С (рис. 7 d).

4. Заключение

С использованием сварки взрывом получено биметаллическое соединение «медь M1 – сталь 09Г2С». Сварной шов на границе соединения характеризуется «волнообразным» строением, малой протяженностью диффузионной зоны, наличием области резкого концентрационного перехода, областей интенсивного перемешивания меди с железом и участков оплавления. Вблизи границы соединения слоев образовалась зона максимального упрочнения шириной около 0,5 мм, которая отличается по механическим свойствам от составляющих биметалла.

По результатам испытаний установлено, что исследуемое биметаллическое соединение имеет комплекс механических свойств, достаточный для того, чтобы рекомендовать его для использования в качестве промышленного конструкционного материала.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60169 мол_а_дк.

Литература

1. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Новосибирск : Наука, 1980. – 220 с.

2. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Сварка взрывом. – М. : Машиностроение, 2005. – 543 с.

3. Кобелев А. Г., Лысак В. И., Чернышев В. Н. Производство слоистых композиционных материалов. – М. : Интермет Инжиниринг, 2002. – 496 с.

4. Findik F. Recent developments in explosive welding // Material and Design. – 2011. – Vol. 32, iss. 3. – P. 1081–1093. – DOI: 10.1016/j.matdes.2010.10.017.

5. ASM Handbook. Volume 6 : Welding, Brazing, and Soldering / D. L. Olson, T. A. Siewert, S. Liu, G. R. Edwards. – ASM International, 1993. – 1299 p.

6. Explosively welded materials bond zone. Morphology and crystallography / V. V. Rybin, Je. A. Ushanova, S. V. Kuz'min, V. I. Lysak // Reviews on Advanced Materials Science. -2012. – Vol. 31, no. 1. – C. 74–77.

7. Smirnov S. V., Veretennikova I. A., Vichuzhanin D. I. Modeling of delamination in multilayer metals produced by explosive welding under plastic deformation // Computational Continuum Mechanics. – 2014. – Vol. 7, no. 4. – P. 398–411. – DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.4.38.

8. Прочность и разрушение металлического композита на основе меди М1 и стали 20 / С.В. Гладковский, Т. А. Трунина, Е. А. Коковихин, С. В. Смирнова, Д. И. Вичужанин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12, № 1 (2). – С. 321–325.

9. Механические свойства и структура слоистых сталеалюминиевых композитов на основе стали 09Г2С, полученных пакетной прокаткой / С. В. Гладковский, Т. А. Трунина, Е. А. Коковихин, С. В. Смирнова, И. С. Каманцев, Е. М. Бородин // Производство проката. – 2012. – № 4. – С. 32–37.

10. Oliver W. C., Phar G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. – 1992. – Vol. 7, no. 6. – P. 1554–1583. – DOI: 10.1557/JMR.1992.1564.

Veretennikova I.A. et al. / Mechanical properties and fracture behavior of the "copper M1 – steel 09G2S" bimetal produced by explosion welding



11. Исследование разрушения границы соединения слоев у полученной сваркой взрывом биметаллической полосы «08Х18Н10Т-сталь 10» при прокатке / С. В. Смирнов, И. А. Веретенникова, И. С. Каманцев, Е. Б. Трушина // Производство проката. – 2014. – № 7. – С. 14–19.

12. Смирнов С. В., Веретенникова И. А. Анизотропия механических свойств листа из биметалла сталь 08Х18Н10Т – сталь Ст10, изготовленного сваркой взрывом // Производство проката. – 2017. – № 1. – С 30–36. (В печати).

13. Смирнов С. В., Швейкин В. П. Пластичность и деформируемость углеродистых сталей при обработке давлением. – Екатеринбург : УрО РАН, 2009. – 255 с.

14. Золоторевский В. С. Механические свойства металлов. – М. : МИСИС, 1998. – 400 с.

15. Veretennikova I. A., Konovalov D. A., Smirnov S. V. Patterns of the change in the mechanical properties of a bimetallic welded joint under plastic deformation // AIP Conf. Proc. – 2016. – Vol. 1785, iss. 1, pp. 040089. – DOI: 10.1063/1.4967146.

16. Диссипативные структуры при сварке взрывом / Б. А. Гринберг, М. А. Иванов, В. В. Рыбин, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, О. А. Елкина, А. М. Пацелов, О. В. Антонова, А. В. Иноземцев, А. Ю. Волкова, А. В. Плотников // Известия ВолгГТУ. – 2012. – № 14 (101). – С. 27–43.