

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНОГО КОМПОЗИТА, СФОРМИРОВАННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ ТОНКОЛИСТОВЫХ СТАЛЕЙ 12Х18Н10Т И Н18К9М5Т*

В.С. ЛОЖКИН¹, аспирант
Е.А. ЛОЖКИНА¹, канд. техн. наук, доцент
В.И. МАЛИ², канд. физ.-мат. наук, в.н.с.
М.А. ЕСИКОВ², м.н.с.
(¹ НГТУ, г. Новосибирск,
² ИГиЛ СО РАН, г. Новосибирск)

Поступила 30 мая 2014
Рецензирование 30 июня 2014
Принята к печати 17 июля 2014

Ложкин В.С. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: logkaa@mail.ru

Исследованы структура и механические свойства многослойного композита, сформированного сваркой взрывом за один этап пластин из сталей 12Х18Н10Т и Н18К9М5Т с последующей термической обработкой при 490 °С. Полученный композиционный материал отличается хорошим качеством соединения пластин. В центральном слое сварного пакета зафиксированы полосы локализованной пластической деформации. Твердость хромоникелевой стали после сварки возросла в два раза по сравнению с исходным состоянием, твердость мартенситно-старееющей стали – на 17 %. Старение мартенситно-старееющей стали приводит к росту ее микротвердости от 4000 МПа до 7500 МПа. Эффект упрочнения обусловлен выделением в процессе старения мелкодисперсных интерметаллидных фаз Ni₃Ti и Fe₂Mo. Ударная вязкость слоистого материала после сварки и старения не уступает ударной вязкости стали 12Х18Н10Т.

Ключевые слова: мартенситно-старееющая сталь, сварка взрывом, слоистые материалы, термическая обработка.

Введение

Повышение прочностных свойств при сохранении высоких характеристик надежности металлических материалов является одной из наиболее актуальных проблем современного материаловедения [1–2]. Высокие показатели конструктивной прочности металлических материалов в промышленном производстве, как правило, обеспечиваются при реализации термической [3], термопластической [4], химико-термической [5] обработки и других методов упрочнения.

Однако на сегодняшний день традиционные технологии повышения конструктивной прочности во многом исчерпали свой потенциал. Перспективным подходом к повышению прочностных свойств материалов при сохранении высоких показателей пластичности, трещиностойкости и ударной вязкости является разработка композиционных материалов различного типа. Особое место среди них занимают металлические слоистые композиционные материалы (МСКМ). Для получения бездефектной структуры на границе соединяемых материалов используются высоко-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-03-31864 мол_а.

технологичные процессы производства МСКМ, такие как диффузионная сварка [6–7], реакционное спекание фольг [8–9], сварка прокаткой [10–11], сварка взрывом [12–13] и др. Из перечисленных технологий получения МСКМ сварка взрывом является наименее исследованной, в то же время весьма перспективной. К достоинствам этой технологии относятся относительная дешевизна оборудования, возможность соединения широкой номенклатуры материалов, высокая скорость процесса, деформационное упрочнение материалов [14–15].

В данной работе технология сварки взрывом использовалась для получения слоистых композиционных материалов, состоящих из слоев хромоникелевой стали 12Х18Н10Т и мартенситно-старееющей стали Н18К9М5Т.

Материалы и методы исследования

В качестве заготовок для сварки использовались пластины из сталей 12Х18Н10Т и Н18К9М5Т размерами 100×60×1 мм. Состав исходных материалов проверяли с использованием опико-эмиссионного спектрометра ARL 3460. Результаты анализа представлены в табл. 1. Перед сваркой исходные материалы подвергались термической обработке по режимам, представленным в табл. 2. Для повышения прочности композиционного материала за счет выделения в слоях из мартенситно-старееющей стали интерметаллидных частиц была проведена дополнительная термическая обработка – выдержка в течение 3 ч при 490 °С (табл. 2). Для стали Н18К9М5Т данный режим соответствует операции старения.

Таблица 1

Элементный состав исходных материалов

Материал	Массовая доля элемента, %									
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti	Co
Н18К9М5Т	0,02	0,01	0,04	0,004	0,007	17,23	0,01	4,28	0,77	8,18
12Х18Н10Т	0,11	0,73	0,55	0,05	0,01	9,18	17,82	–	0,54	–

Таблица 2

Режимы термической обработки стальных заготовок

Материал	Вид термической обработки	Температура нагрева, °С	Среда
Сталь 12Х18Н10Т	Закалка	1100	Вода
Сталь Н18К9М5Т	Закалка	820	Воздух
Слоистый композит «сталь 12Х19Н10Т – сталь Н18К9М5Т»	Старение	490	Воздух

Сварку взрывом осуществляли в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. Тринадцать стальных пластин сваривали за один этап по симметричной угловой схеме (рис. 1). В качестве взрывчатого вещества использовали аммонит 6ЖВ. Расчетные значения скоростей точек контакта и углов соударения пластин представлены в табл. 3. Зазор между тремя центральными пластинами составил 2 мм; зазоры между остальными пластинами были равны 5 мм.

Структурные исследования композиционного материала выполняли с использованием металлографического микроскопа Carl ZeissAxio

Observer A1m и растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 50 XVP. Металлографические шлифы готовили по стандартной технологии, основанной на механическом шлифовании и полировании анализируемого материала. Для выявления микроструктуры мартенситно-старееющей стали использовали пятипроцентный спиртовой раствор азотной кислоты, а для хромоникелевой стали – электролитическое травление в 60 %-м водном растворе азотной кислоты при плотности тока 10 А/см² [16]. В качестве показателей механических свойств слоистых материалов использовали уровень их микротвердости и ударной вязкости [17].

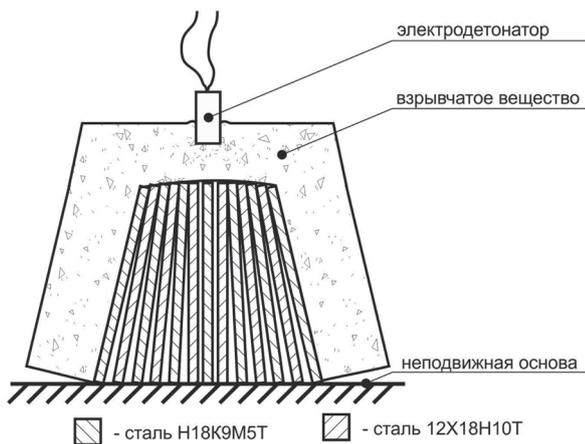


Рис. 1. Схема сварки взрывом стальных пластин

Таблица 3

Расчетные значения скоростей точек контакта и углов соударения пластин

№ п/п	Скорость точки контакта, м/с	Угол соударения
1	3721	32° 29'
2	3232	18° 28'
3	2693	14° 46'
4	2201	13° 31'
5	1792	13° 16'
6	1792	11° 1'
7	1792	11° 1'
8	1792	13° 16'
9	2201	13° 31'
10	2693	14° 46'
11	3232	18° 28'
12	3721	32° 29'

Результаты исследований и их обсуждение

Общий вид поперечного сечения тринадцатислойного композиционного материала представлен на рис. 2. Полученный материал характеризуется хорошим качеством соединения стальных заготовок. Композит имеет слоистую структуру с различным профилем сварных швов. На поперечных шлифах наблюдаются как

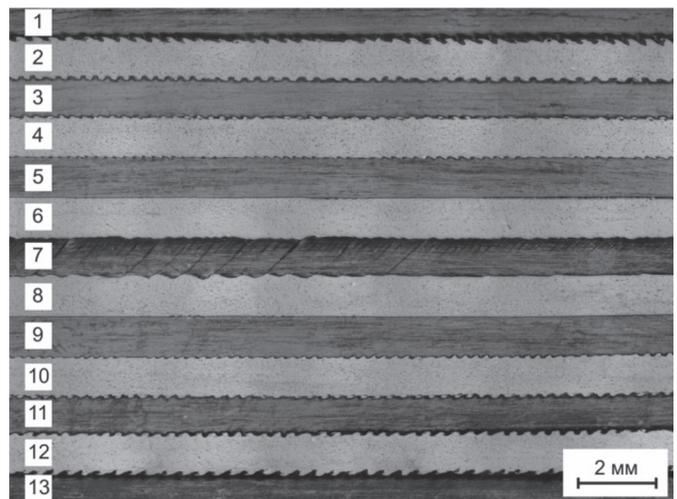


Рис. 2. Строение многослойного материала в поперечном сечении:

слои 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 – сталь Н18К9М5Т; слои 2, 4, 6, 8, 10, 12 – сталь 12Х18Н10Т

прямолинейные границы, так и границы волнообразной формы. Значения длины (λ) и амплитуды (A) зафиксированных волн представлены в табл. 4. Значения отношения A/λ находятся в диапазоне 0,14...0,3, что соответствует экспериментальным данным, зафиксированным в работах других авторов [18]. Формирование прямых сварных швов и соединений волнообразной формы с разными геометрическими параметрами обусловлено различием скоростей и значений энергии соударения стальных пластин.

Структура композиционного материала на границах и в центре пластин существенно отличается. Важнейшей особенностью сварки взрывом является неоднородное распределение тепла по толщине соединяемых заготовок. Центральные, наименее деформированные зоны пластин, в процессе сварки остаются относительно холодными. Наиболее высокий уровень температур характерен для локальных зон вблизи границ соединения стальных заготовок. В этих зонах зафиксированы следы оплавления пластин и перемешивание микрообъемов соединяемых материалов, в результате чего формиру-

Таблица 4

Параметры волн сварных соединений

Параметры сварных швов	Номер сварного шва											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
λ , мкм	233	277	–	–	–	–	–	–	–	142	205	270
A , мкм	67	61	–	–	–	–	–	–	–	42	66	84
A/λ	0,28	0,22	–	–	–	–	–	–	–	0,29	0,32	0,31

ются микрообъемы, состав которых отличается от химического состава исходных сталей (рис. 3, табл. 5).

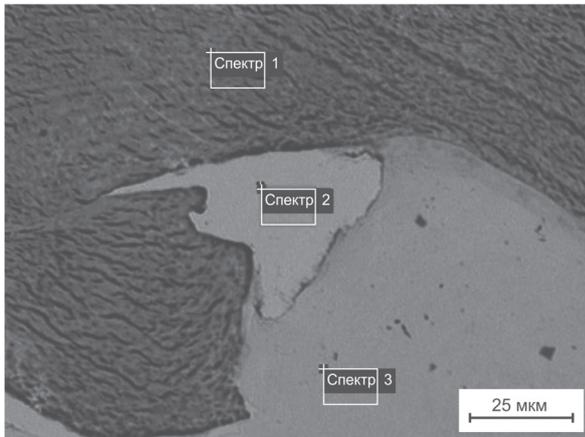


Рис. 3. Участки съемки спектров на поверхности слоистого материала «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т»

Вблизи вершин и впадин волн наблюдаются характерные вихревые построения. Металлографический анализ свидетельствует о их дефектном состоянии. Внутри вихрей возможно формирование пор и характерных микротрещин, являющихся результатом действия внутренних напряжений.

Вблизи границ сварных швов можно выделить зоны деформационно упрочненного материала, образующиеся в результате высокоскоростного соударения металлических пластин. Наибольшая глубина деформированного слоя наблюдается на гребнях волн, наименьшая – во впадинах.

Симметричная схема сварки, использованная в работе, имеет свои особенности: максимальное давление создается в центральной заготовке в результате одновременного воздействия на

Таблица 5

Результаты микрорентгеноспектрального анализа околосшовной области слоистого материала «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т»

Анализируемый участок	Ni, %	Co, %	Mo, %	Cr, %	Ti, %	Si, %	Fe, %
Спектр 1	25,57	5,97	20,95	–	2,58	–	44,93
Спектр 2	15,34	6,12	4,15	5,83	0,76	–	67,81
Спектр 3	8,91	–	–	18,81	0,62	0,54	71,12

нее боковых пластин. Эта особенность объясняет формирование в центральной зоне сварного пакета полос локализованного пластического течения. Причиной их образования является термическое разупрочнение материала в результате локализованного нагрева в процессе неоднородной пластической деформации [19–22]. Полосы ориентированы в направлении максимальных касательных напряжений. Результатом развития полос локализованного пластического течения может быть образование в материале микротрещин.

Механические свойства слоистых материалов

В процессе высокоскоростного соударения стальных пластин структура материалов в зонах сварных швов претерпевает кардинальные преобразования, обусловленные интенсивной пластической деформацией. Степень деформа-

ционного упрочнения материалов оценивали путем измерения микротвердости тринадцатислойных сварных соединений (рис. 5). Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии резких скачков микротвердости в сваренном и термически не обработанном многослойном пакете. Микротвердость композита находится в пределах 4000...5000 МПа. Микротвердость деформированной стали 12Х18Н10Т в сваренных взрывом пакетах достигает 4540 МПа. По сравнению с исходным состоянием твердость хромоникелевой стали возросла в 2 раза. Аналогичный результат был зафиксирован в работе [23]. Микротвердость мартенситно-старееющей стали в процессе сварки возросла с 3400 МПа до 4000 МПа.

После термической обработки, заключающейся в нагреве и трехчасовой выдержке композита при 490 °С, микротвердость мартенситно-старееющей стали существенно возросла. Наблюдаемый рост микротвердости этой стали

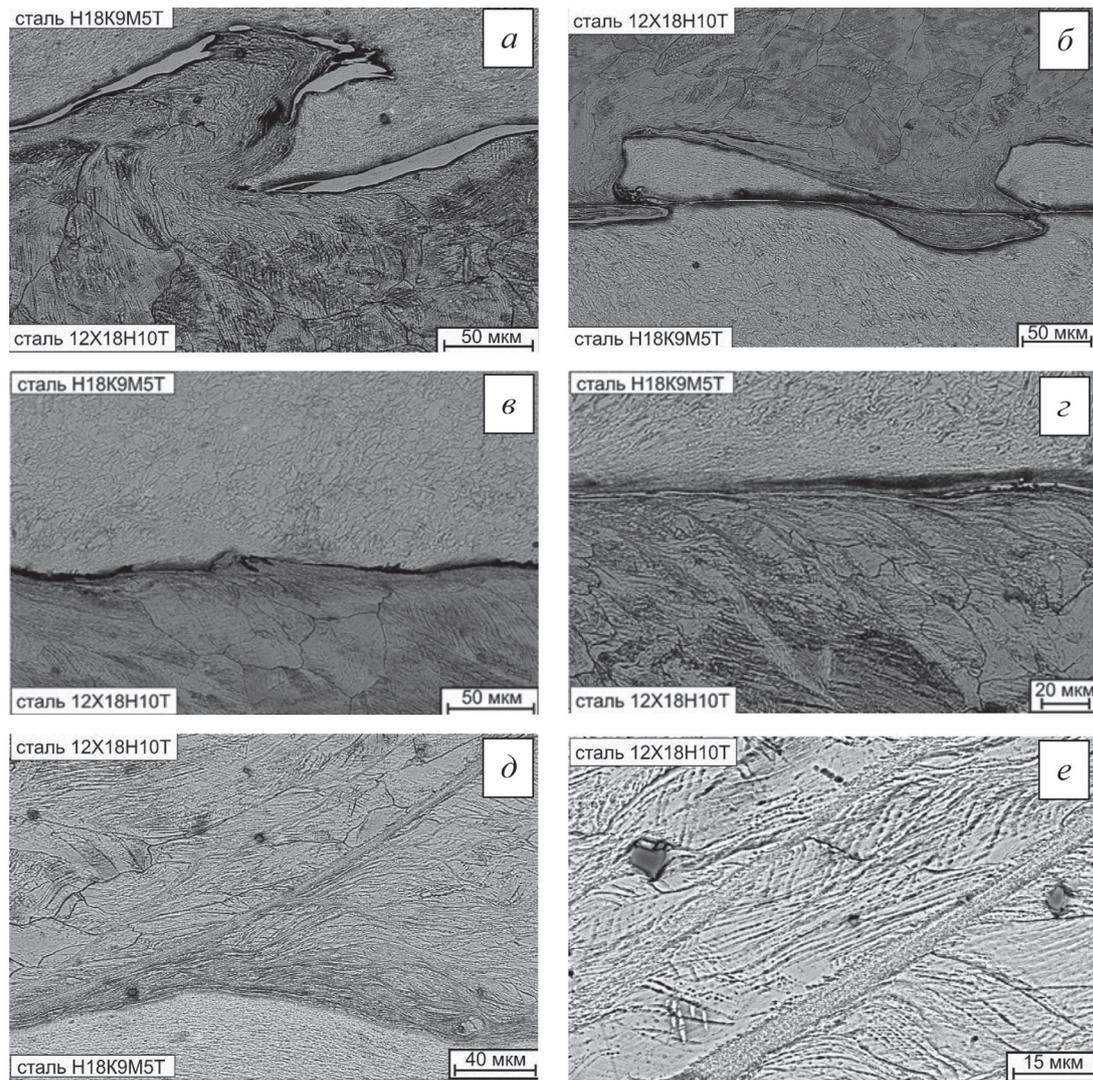


Рис. 4. Особенности строения многослойного композита, сформированного сваркой взрывом тонколистовых сталей 12X18H10T и N18K9M5T:

a – вихревые зоны и зоны интенсивно-деформированного материала на волнообразной границе; *б* – продольное смещение бугров деформации при сварке взрывом разнородных сталей; *в* – гладкая граница соединения стальных слоев; *г-е* – полосы локализованной пластической деформации в стали 12X18H10T

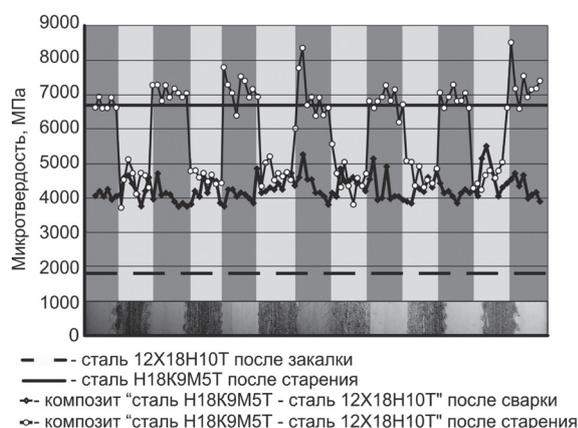


Рис. 5. Распределение микротвердости по слоям композиционного материала «сталь 12X18H10T – сталь N18K9M5T»

от 4000 МПа до 7500 МПа обусловлен выделением в процессе старения упрочняющих мелкодисперсных интерметаллидных фаз Ni_3Ti и Fe_2Mo [23]. Отдельные пики на графике достигают 8000 МПа, что почти на 20 % превышает значения, полученные при закалке и старении стали N18K9M5T.

Ударная вязкость композита «сталь N18K9M5T – сталь 12X18H10T» составляет 200 Дж/см², что практически не уступает ударной вязкости стали 12X18H10T (210 Дж/см²) (рис. 6). Следует отметить, что ударная вязкость стали N18K9M5T в закаленном и состаренном состоянии примерно в 5 раз ниже ударной вязкости стали 12X18H10T. Таким образом, высокий

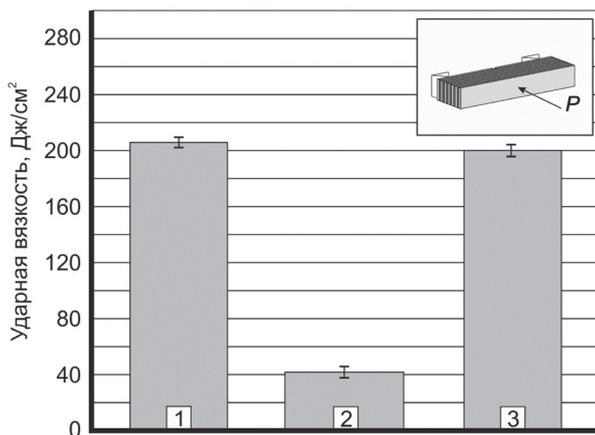


Рис. 6. Результаты испытаний материалов на ударную вязкость:

1 – сталь 12X18H10T после закалки; 2 – сталь N18K9M5T после закалки и старения [24]; 3 – композит «сталь 12X18H10T – сталь N18K9M5T» после сварки и старения

уровень ударной вязкости слоистого композита объясняется положительным влиянием границ раздела стальных пластин.

Выводы

В результате сварки взрывом и последующей термической обработки сформирован металлический композиционный материал со слоистой структурой, обладающий высоким комплексом механических свойств. Несмотря на то что более половины объема сварного пакета занято мартенситно-старееющей сталью, находящейся в высокопрочном состоянии, ударная вязкость слоистого материала после сварки и старения (200 Дж/см^2) всего на 5 % ниже по сравнению с соответствующими значениями стали 12X18H10T (210 Дж/см^2). Термическая обработка сварного пакета при $490 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к росту твердости мартенситно-старееющей стали до 8000 МПа , что почти на 20 % превышает значения, полученные при закалке и старении недеформированной стали N18K9M5T. Дополнительный прирост твердости является результатом деформационного упрочнения, имеющего место в процессе высокоскоростного соударения свариваемых пластин.

Список литературы

1. Энтин Р.И., Курдюмов Г.В. Пути повышения прочности и пластичности конструкционных ста-

лей // Вестник Академии наук СССР. – 1967. – № 8. – С. 20–26.

2. Тушинский Л.И. Структурная теория конструктивной прочности материалов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 400 с.

3. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.

4. Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Кануткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

5. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.

6. Korzhov V.P., Kiiko V.M., Karpov M.I. Structure of multilayer microcomposite Ni/Al obtained by diffusion welding // Inorganic Materials: Applied Research. – 2012. – Vol. 3, iss. 4. – P. 314–318.

7. Optimizing the Diffusion Welding Process for Alloy 800H: Thermodynamic, Diffusion Modeling, and Experimental Work / R.E. Mizia, D.E. Clark, M.V. Glazoff, T.E. Lister, T.L. Trowbridge // Metallurgical and Materials Transactions: A. – 2013. – Vol. 44, iss. 1. – P. 154–161.

8. Harach D.J., Vecchio K.S. Microstructure evolution in metal-intermetallic laminate (MIL) composites synthesized by reactive foil sintering in air // Metallurgical and Material Transaction: A. – 2001. – Vol. 32, iss. 6. – P. 1493–1505.

9. Resistance-curve and fracture behavior of Ti-Al₃Ti metallic-intermetallic laminate (MIL) composites / A. Rohatgi, D.J. Harach, K.S. Vecchio, K.P. Harvey // Acta Materialia. – 2003. – Vol. 51, iss. 10. – P. 2933–2957.

10. Luo J.-G., Acoff V.L. Using cold roll bonding and annealing to process Ti/Al multi-layered composites from elemental foils // Materials Science and Engineering: A. – 2004. – Vol. 379, iss. 1-2. – P. 164–172.

11. Kong F., Chen Y., Zhang D. Interfacial microstructure and shear strength of Ti6Al4V/TiAl laminate composite sheet fabricated by hot packed rolling // Materials and Design. – 2011. – Vol. 32, iss. 5. – P. 3167–3172.

12. The increase of structural strength of multilayered materials produced by explosive welding of dissimilar steels thin plates / E.A. Prikhodko, V.S. Lozhkin, V.I. Mali, M.A. Esikov // The 8 international forum on strategic technologies (IFOST 2013): proceedings, Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013. – Ulaanbaatar, 2013. – Vol. 1. – P. 37–40.

13. The effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of multilayered composites welded by explosion / E.A. Prikhodko, I.A. Bataev, A.A. Bataev, V.S. Lozhkin, V.I. Mali, M.A. Esikov // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 535-537. – P. 231–234.

14. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. – М.: Машиностроение, 2005. – С. 121–138.

15. *Батаев И.А.* Структура и механические свойства многослойных материалов, сформированных по технологии сварки взрывом тонколистовых заготовок из низкоуглеродистой стали: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2010. – 266 с.
16. ASM HandBook. Vol. 9. Metallography and microstructures / prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee; vol. ed. G.F. Vander Voort. – [Ohio], USA: Materials Park: ASM International, 2004. – 1184 p. – ISBN: 978-0-87170-706-2.
17. ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – Введ. 1979–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 12 с.
18. *Дерибас А.А.* Физика упрочнения и сварки взрывом. – 2-е изд., доп. и перераб. – Новосибирск: Наука, 1972. – С. 130.
19. Локализация пластического течения в низкоуглеродистой стали, деформированной взрывом / И.А. Батаев, А.А. Батаев, И.А. Балаганский, В.Г. Бузов, Е.А. Приходько, Н.А. Морева, А.А. Руктуев // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14, № 1. – С. 93–99.
20. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов: [тр. междунар. конф., 1980 г. в США] / под ред. М.А. Мейерса, Л.Е. Мурра; пер. с англ. Л.М. Бернштейна и др.; под ред. Г.Н. Эпштейна. – М.: Металлургия, 1984. – С. 121–151.
21. Microstructural development of adiabatic shear bands in ultra-fine-grained low-carbon steels fabricated by equal channel angular pressing / B. Hwang, S. Lee, Y.C. Kim, N.J. Kim, D.H. Shin // Materials Science and Engineering: A. – 2006. – Vol. 441, iss. 1-2. – P. 308–320.
22. A microstructural investigation of adiabatic shear bands in an interstitial free steel / J.F.C. Lins, H.R.Z. Sandim, H.-J. Kestenbach, D. Raabe, K.S. Vecchio // Materials Science and Engineering: A. – 2007. – Vol. 457, iss. 1-2. – P. 205–218.
23. *Sha W., Guo Z.* Maraging steels: modelling of microstructure, properties and applications. – Boca Raton, Florida: CRC Press; Oxford: Woodhead Pub., 2009. – 203 p.
24. *Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н.А.* Конструкционные материалы: справочник. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(64), July – September 2014, Pages 28–36

Structure and mechanical properties of multilayered composite material, formed by explosive welding of steel 12X18H10T and steel H18K9M5T thin plates

Lozhkin V.S.¹, Post-graduate Student, e-mail: logkaa@mail.ru

Lozhkina E.A.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: helens_case@mail.ru

Mali V.I.², Ph.D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, e-mail: mali@hydro.nsc.ru

Esikov M.A.², Junior Researcher, e-mail: EsikovMaxim@ngs.ru

¹Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

²Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the RAS, 15 Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Abstract

The research of the structure and mechanical properties of multilayered composite material, formed by one step explosive welding of the plates of steel 12X18H10T and steel H18K9M5T followed by heat treatment, is conducted. Composite material has a high quality of the joints. Bands of localized plastic deformation are detected in the central layers of the welded pack. Such bands formation is undesirable effect, accompanying explosive welding process. The hardness of austenitic Ni-Cr stainless steel in the welded pack increased twofold in comparison with its initial state. The hardness of maraging steel is up by 17 per cent. Age-hardening of the multilayered composite material leads to the growth of maraging steel layers hardness. The observed increase in the hardness of this steel from 4000 MPa to 7500 MPa is due to the precipitation of hardening fine intermetallic phases (Ni₃Ti, Fe₂Mo) during age-hardening. The toughness of the multilayered material after explosive welding and age-hardening is not inferior the steel 12X18H10T toughness.

Keywords:

maraging steel, explosive welding, multilayered materials, heat treatment.

References

1. Entin R.I., Kurdyumov G.V. Puti povysheniya prochnosti i plastichnosti konstruktsionnykh stalei [Ways to improve the strength and ductility of structural steels]. *Vestnik Akademii nauk SSSR – Herald of the Russian Academy of Science*, 1967, no. 8, pp. 20-26 (in Russian).
2. Tushinsky L.I. *Strukturnaya teoriya konstruktivnoi prochnosti materialov* [The Structural Theory of Constructive Strength of Materials]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004. 400 p.
3. Novikov I.I. *Teoriya termicheskoi obrabotki metallov* [The theory of heat treatment of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 480 p.
4. Bernshtein M.L., Zaimovskii V.A., Kaputkina L.M. *Termomekhanicheskaya obrabotka stali* [Thermomechanical processing of steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 480 p.
5. Lakhtin Yu.M., Arzamasov B.N. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov* [Chemical heat treatment of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 256 p.
6. Korzhov V.P., Kiiko V.M., Karpov M.I. Structure of multilayer microcomposite Ni/Al obtained by diffusion welding. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2012, vol. 3, iss. 4, pp. 314-318. doi: 10.1134/S2075113312040107
7. Mizia R.E., Clark D.E., Glazoff M.V., Lister T.E., Trowbridge T.L. Optimizing the Diffusion Welding Process for Alloy 800H: Thermodynamic, Diffusion Modeling, and Experimental Work. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2013, vol. 44, iss. 1, suppl., pp. 154-161. doi: 10.1007/s11661-011-0991-6
8. Harach D.J., Vecchio K.S. Microstructure evolution in metal-intermetallic laminate (MIL) composites synthesized by reactive foil sintering in air. *Metallurgical and material transaction: A*, 2001, vol. 32, iss. 6, pp. 1493-1505. doi: 10.1007/s11661-001-0237-0
9. Rohatgi A., Harach D.J., Vecchio K.S., Harvey K.P. Resistance-curve and fracture behavior of Ti-Al₃Ti metallic-intermetallic laminate (MIL) composites. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, iss. 10, pp. 2933–2957. doi: 10.1016/S1359-6454(03)00108-3
10. Luo J.-G., Acoff V.L. Using cold roll bonding and annealing to process Ti/Al multi-layered composites from elemental foils. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 379, iss. 1-2, pp. 164-172. doi: 10.1016/j.msea.2004.01.021
11. Kong F., Chen Y., Zhang D. Interfacial microstructure and shear strength of Ti₆Al₄V/TiAl laminate composite sheet fabricated by hot packed rolling. *Materials and Design*, 2011, vol. 32, iss. 6, pp. 3167-3172. doi: 10.1016/j.matdes.2011.02.052
12. Prikhodko E.A., Lozhkin V.S., Mali V.I., Esikov M.A. The increase of structural strength of multilayered materials produced by explosive welding of dissimilar steels thin plates. The 8 international forum on strategic technologies (IFOST 2013): proceedings, Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013, Ulaanbaatar, 2013, vol. 1, pp. 37-40.
13. Prikhodko E.A., Bataev I.A., Bataev A.A., Lozhkin V.S., Mali V.I., Esikov M.A. The effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of multilayered composites welded by explosion. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 535-537, pp. 231-234. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.231
14. Lysak V.I., Kuz'min S.V. *Svarka vzryvom* [Explosion Welding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 544 p.
15. Bataev I.A. *Struktura i mekhanicheskie svoystva mnogosloinnykh materialov, sformirovannykh po tekhnologii svarki vzryvom tonkolistovykh zagotovok iz nizkouglerodistoi stali*. Diss. kand. tekhn. nauk [Structure and mechanical properties multilayer materials formed by explosion welding thin sheets of mild steel workpieces. Dr. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, 2010. 233 p.
16. Vander Voort G.F., ed. *ASM Handbook. Vol. 9: Metallography and Microstructures*. Ohio, USA, ASM International Publ., 2004. 1184 p. ISBN: 978-0-87170-706-2.
17. *GOST 9454-78. Metally. Metod ispytaniya na udarnyy izgib pri ponizhennyh, komnatnoj i povyshennyh temperaturah* [State Standard 9454-78. Metals. Method for testing the impact strength at low, room and high temperature]. Moscow, Standartinform Publ., 2002. 12 p.
18. Deribas A.A. *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom* [Physics of hardening and explosion welding]. 2nd ed. Novosibirsk, Nauka Publ., 1972. 130 p.
19. Bataev I.A., Bataev A.A., Balaganskii I.A., Burov V.G., Prikhod'ko E.A., Moreva N.A., Ruktuev A.A. Lokalizatsiya plasticheskogo techeniya v nizkouglerodistoi stali, deformirovannoi vzryvom [Plastic flow localization in explosion-deformed low-carbon steel]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2011, vol. 14, no. 1, pp. 93-99.
20. Meyers M.A., Murr L.E. *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals. Concepts and Applications. Proceedings of an international conference on Metallurgical Effects of High-Strain-Rate Deformation*

and Fabrication, held June 22-26, 1980, in Albuquerque, New Mexico. New York, Plenum Press Publ., 1981. 1101 p. (Russ. ed.: Meyers M.A., Murr L.E. *Udarnye volny i yavleniya vysokoskorostnoi deformatsii metallov. Trudy mezhdunarodnoi konferentsii, 1980. SShA*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 515 p.). ISBN-13: 978-1-4613-3221-3. e-ISBN-13: 978-1-4613-3219-0. doi: 10.1007/978-1-4613-3219-0

21. Hwang B., Lee S., Kim Y.C., Kim N.J., Shin D.H. Microstructural development of adiabatic shear bands in ultra-fine-grained low-carbon steels fabricated by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, vol. 441, iss. 1-2, pp. 308–320. doi: 10.1016/j.msea.2006.08.045

22. Lins J.F.C., Sandim H.R.Z., Kestenbach H.-J., Raabe D., Vecchio K.S. A microstructural investigation of adiabatic shear bands in an interstitial free steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, vol. 457, iss. 1-2, pp. 205–218. doi: 10.1016/j.msea.2006.12.019

23. Sha W., Guo Z, eds. *Maraging Steels: Modelling of Microstructure, Properties, and Applications*. Boca Raton, Florida, CRC Press Publ., Oxford, Woodhead Pub., 2009. 203 p. ISBN-10: 1439818770. ISBN-13: 978-1439818770.

24. Arzamasov B.N., Brostrem V.A., Bushe N.A. et al. *Konstruktsionnye materialy: Spravochnik* [Structural materials: Reference book]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 688 p. ISBN 5-217-01112-2.

Funding

The reported study was partially supported by RFBR, research project No. 14-03-31864 мол_a.

Received 30 May 2014

Revised 30 June 2014

Accepted 17 July 2014