

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНОГО КОМПОЗИТА, СФОРМИРОВАННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ ТОНКОЛИСТОВЫХ ПЛАСТИН ИЗ СТАЛЕЙ 20 И Н18К9М5Т

*В.С. ЛОЖКИН, аспирант
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 26 июля 2013 года

Рецензирование 26 августа 2013 года

Принята к печати 5 сентября 2013 года

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

Изучены структура и механические свойства тринадцатислойных композитов, полученных методом сварки взрывом пластин из углеродистой стали 20 и мартенситно-стареющей стали Н18К9М5Т. Прирост ударной вязкости композита составил 20 % по сравнению с исходной сталью 20. Экспериментальные значения предела прочности многослойной композиции на 27 % выше расчетных значений. Повышение прочности обусловлено деформационным упрочнением сталей, а также последующей термической обработкой сварных пакетов. Методами металлографического анализа изучены особенности структурных преобразований, происходящих в зонах сопряжения разнородных стальных пластин. Формирование прямых сварных швов и соединений волнообразной формы обусловлено особенностями распределения давления в точках контакта пластин на различном расстоянии от взрывчатого вещества. Методами электронной микроскопии сварных пакетов изучены области сильнодеформированного материала, рекристаллизованного материала и вихревых зон с литым строением.

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

Введение

Известно, что характер развития многих промышленных технологий и показатели создаваемых образцов новой техники в значительной степени определяются свойствами применяемых материалов. В современных авиа- и ракетостроении, энергетике, химическом машиностроении и других отраслях производства одними из основных критериев, учитываемых специалистами, являются металлоемкость и надежность создаваемых конструкций [1, 2]. С целью повышения показателей конструктивной прочности металлических материалов в промышленном производстве широко используются традиционные методы обработки материалов, в том числе термическая [3], термопластическая [4], химико-термическая [5]. В то же время во многих случаях более рациональным является применение композиционных материалов, полученных с использованием процессов сварки взрывом [6], нанесения покрытий [7], порошковой металлургии [8].

Сварка взрывом как технологический процесс появилась сравнительно недавно. Во многих случаях этот процесс рассматривают в качестве эффективно-го решения проблемы соединения материалов, склонных к образованию хрупких интерметаллидных фаз [9]. Проведенный анализ показал, что один из рациональных подходов к проблеме повышения комплекса механических свойств материалов конструкционного назначения может быть основан на применении слоистых композиционных материалов, полученных по технологии сварки взрывом мартенситно-стареющих сталей с низкоуглеродистыми.

Материалы и методы исследования

Материалом исследования являлся металлический слоистый тринадцатислойный пакет из сталей 20 и Н18К9М5Т, полученный сваркой взрывом. Для сварки использовали стальные пластины размерами 1×60×100 мм. Химический состав материалов, зафиксированный с использованием оптико-эмиссионного

Химический состав 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
Сталь 20	0,18	0,47	0,18	0,01	0,02	0,03	0,01	–	–	–

спектрометра ARL 3460, представлен в табл. 1. Для снижения уровня механических напряжений и устранения структурной неоднородности исходные материалы подвергали термической обработке по режимам, представленным в табл. 2.

Таблица 2

Термическая обработка стальных заготовок

Материал	Обработка	Среда	Температура, °С
Сталь 20	Отжиг	Вакуум	920
Сталь Н18К9М5Т	Закалка	Воздух	820
Слоистый композит «сталь 20 – сталь Н18К9М5Т»	Старение	Воздух	490

Сварку взрывом и расчет технологических параметров процесса осуществляли сотрудники Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. Пластины сваривали за один этап с использованием симметричной угловой схемы (рис. 1). В качестве взрывчатого вещества использовали аммонит БЖВ. Расчетные значения скоростей точек контакта и углов соударения пластин на 1, 2, 3, 4, 5 и 6 границах составили 3613 м/с и 33° 33'; 2984 м/с и 20° 2'; 2360 м/с и 16° 51'; 1844 м/с и 16° 10'; 1449 м/с и 16° 28'; 1449 м/с и 13° 39' соответственно. После сварки многослойные пакеты в течение трех часов выдерживали в печи при температуре 490 °С, обеспечивающей развитие процессов старения мартенситно-стареющей стали.

Исследования структуры композиционного материала выполняли с применением металлографического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m, растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 50 XVP и просвечивающего электронного микроскопа

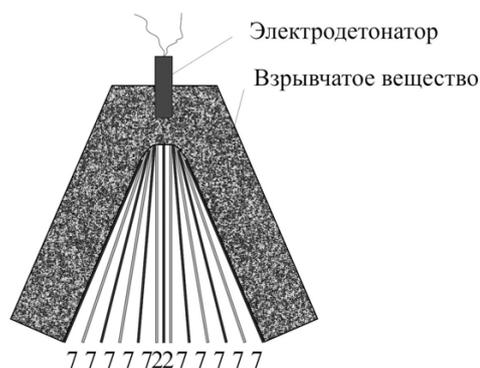


Рис. 1. Схема сварки взрывом стальных пластин. Цифры соответствуют величине зазоров между чередующимися пластинами

FEI Tecna 20 G2 TWIN. Металлографические шлифы готовились по стандартной технологии, основанной на механическом шлифовании и полировании анализируемого материала. Для выявления микроструктуры использовали 5 %-й спиртовой раствор азотной кислоты [11].

Результаты исследований и их обсуждение

Общий вид тринадцатислойного композиционного материала в поперечном сечении представлен на рис. 2. Форма границ сопряжения стальных заготовок в поперечном сечении стального пакета различна. В сварных швах, расположенных ближе к слою взрывчатого вещества, наблюдается волнообразование (рис. 3), что свидетельствует о высоком уровне давления в области точки контакта. По мере приближения к центру пакета волны становятся менее выраженными и, начиная с третьего шва, практически исчезают (рис. 4). Геометрические параметры волн сварных швов представлены в табл. 3. Форма дефор-

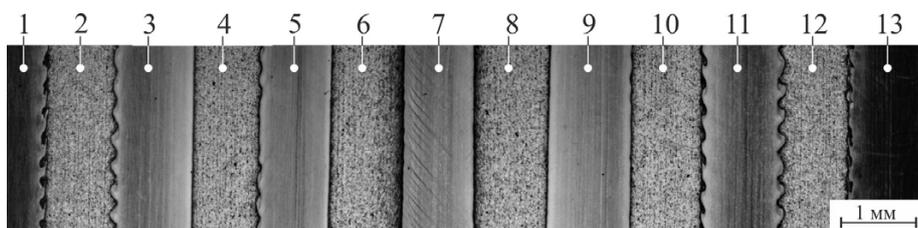


Рис. 2. Строение многослойного материала в поперечном сечении. Слои 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 – сталь Н18К9М5Т, слои 2, 4, 6, 8, 10, 12 – сталь 20

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

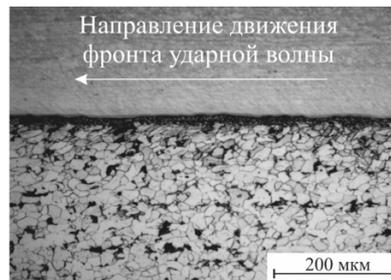
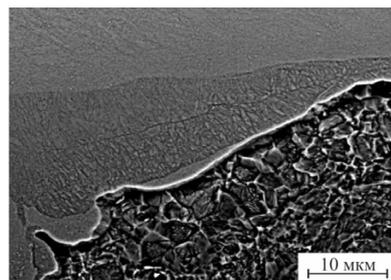
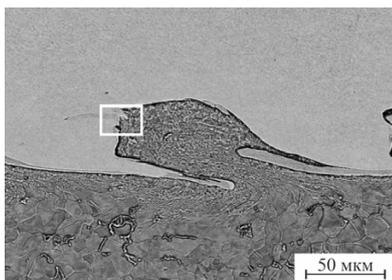

a

б

 Рис. 3. Строение одиннадцатого (*a*) и восьмого (*б*) сварных швов

 Рис. 4. Строение гребня волны сварного шва № 10.
Растровая электронная микроскопия

мированных зерен в заготовках из стали 20 определяется направлением распространения фронта ударной волны (рис. 3).

Металлографические исследования не позволяют провести детальный анализ структуры в зонах соединения пластин. Решение этой задачи выполняли с использованием растровой электронной микроскопии. В стали 20 в зонах сварных швов выявлены слои рекристаллизованных зерен феррита. Средний размер зерен составляет 3 мкм, толщина слоев не превышает 30 мкм (рис. 4, *a*).

В ходе электронно-микроскопических исследований зафиксирована литая структура вихрей с характерным дендритным строением. Формирование вихрей связано с внедрением разогретых до высоких температур микрообъемов одного материала в другой, его частичным оплавлением в результате превращения кинетической энергии в тепловую, трением смежных микрообъемов материала [12]. Проведенный анализ показал, что температура в зонах вихрей превышала $\sim 1500^\circ\text{C}$ [13].

Механические свойства слоистых материалов

Оценку прочностных свойств слоистого композита проводили на измерительном комплексе Instron 3369 в условиях растяжения плоских образцов по ГОСТ 1497-84 [14]. Результаты прочностных испытаний исходных материалов и сварных слоистых пакетов после термической обработки представлены на рис. 5. Предел прочности многослойного композита «сталь 20 – сталь Н18К9М5Т» составляет 1500 МПа, что на 20 % ниже, чем стали Н18К9М5Т. Расчетные значения предела прочности композита, полученные с использованием правила фаз, составляют 1180 МПа. Наблюдаемое отклонение объясняется деформационным упрочнением стальных пластин, проявляющимся при интенсивной пластической деформации заготовок.

Испытания на ударную вязкость были проведены при комнатной температуре на маятниковом копре Metrocom в соответствии с ГОСТ 9454-78 [16]. Надрезы на образцах имели V-образную форму. Результаты динамических испытаний представлены на рис. 6. Анализ полученных результатов свидетельствует об увеличении

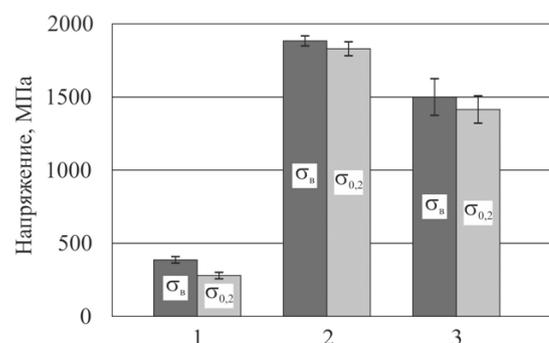


Рис. 5. Результаты прочностных испытаний материалов:

1 – сталь 20; 2 – сталь Н18К9М5Т;
3 – КМ «сталь 20 – сталь Н18К9М5Т»

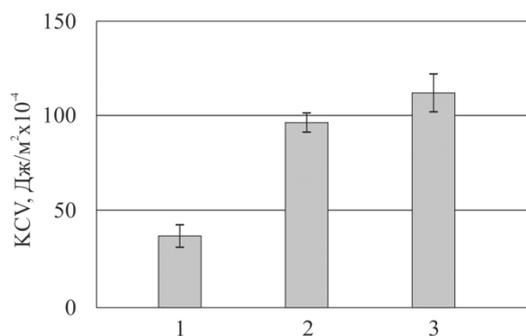


Рис. 6. Результаты испытаний материалов на ударную вязкость:

1 – сталь H18K9M5T; 2 – сталь 20; 3 – композит «сталь 20 – сталь H18K9M5T»

ударной вязкости композита на 20 % по сравнению с пластичной сталью 20. Прирост ударной вязкости объясняется благоприятным влиянием межслойных границ и формированием в зоне сварных швов прослоек рекристаллизованных зерен.

Выводы

1. Сварка взрывом позволяет получать многослойные материалы с прочно соединенными слоями феррито-перлитной стали 20 и закаленной стали H18K9M5T. В процессе соединения тонколистовых заготовок в стали 20 образуются прослойки рекристаллизованного феррита шириной, не превышающей 25 мкм.

2. Формирование слоистой структуры композита «сталь 20 – сталь H18K9M5T» сопровождается увеличением ударной вязкости на 20 %. Экспериментальные значения предела прочности многослойной композиции «сталь 20 – сталь H18K9M5T» на 27 % выше расчетных значений. Различия в уровне прочностных свойств обусловлены деформационным упрочнением стальных пластин, проявляющимся в процессе сварки взрывом.

Список литературы

1. Солнцев Ю.П. Специальные материалы в машиностроении. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2004. – 640 с.
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. Структура деформированных металлов. – М.: Металлургия, 1977. – 431 с.

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

6. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. – М.: Машиностроение, 2005. – 544 с.

7. Cladding of Tantalum and Niobium on Titanium by Electron Beam, Injected in Atmosphere / М.Г. Голковский, И.А. Батаев, А.А. Батаев, С.В. Веселов, В.А. Батаев, Т.В. Журавина, Е.А. Приходько // Advanced Materials Research. - Vols. 314–316 (2011), pp. 23–27.

8. Структурно-фазовое состояние Fe-содержащих сплавов, модифицированных ультра- и нанодисперсными порошками оксидов d-металлов / А.П. Зыкова, М.Ю. Новомейский, И.А. Курзина, А.А. Никулина, А.С. Князев // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2012. – № 4 (57). – С. 72–78.

9. Свойства интерметаллидных прослоек в слоистых титано-алюминиевых композитах / Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков, Д.В. Проничев, В.Н. Арисова, О.С. Киселев, А.Ю. Кондратьев, С.В. Панков // Известия Волгогр. гос. техн. ун-та. – 2009. – Вып. 3. – № 11(59). – С. 35–40.

10. Производство металлических слоистых композиционных материалов / А.Г. Кобелев, В.И. Лысак, В.Н. Чернышев [и др.]. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 496 с.

11. Металлографические реактивы. Справочник. – М.: Металлургия, 1981. – 120 с.

12. Батаев И. А. Структура и механические свойства многослойных материалов, сформированных по технологии сварки взрывом тонколистовых заготовок из низкоуглеродистой стали: дис. ... канд. техн. наук : 05.16.09. Новосибирск, 2010. – С. 116.

13. Материаловедение и технология металлов : учеб. для студентов вузов, обучающихся по машиностроит. спец. / [Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др.]. М.: Высш. шк., 2000. – 639 с.

14. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 1986–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 37 с.

15. Батаев А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учебник. / А.А. Батаев., В.А. Батаев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.

16. ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. Введ. 1979–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 14 с.

Obработка metallo

N 3 (60), July–September 2013, Pages 110–114

Structure and properties of multilayered composite, formed by explosive welding of steel 20 and steel H18K9M5T thin plates

V.S. Lozhkin

Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,

Novosibirsk, 630073, Russia

E-mail: logkaa@mail.ru

Abstract

The structure and mechanical properties of 13-layered composites produced by explosive welding of carbon steel 20 and maraging steel H18K9M5T plates is investigated. The toughness gain of the composite was 20 % in comparison with the original steel 20. The experimental value of the multilayer composition tensile strength is 27 % higher than the calculated value. Strength improvement is due to strain hardening and weld-fabricated package subsequent heat treatment. The characteristics of the structural changes taking place in the areas of interfacing disparate steel plates are investigated by the methods of metallographic analysis. The formation of the straight and wave-shaped welded joints is due to the peculiarities of the pressure distribution in the contact points of plates at different distances from the explosive. The regions of the heavily deformed material, recrystallized material and vortex zones with a cast structure are studied by electron microscopy of the weld-fabricated packages.

Keywords: Explosive welding, layered materials, maraging steel, heat treatment

References

1. Solncev Yu.P. *Special'nye materialy v mashinostroenii* (Special materials in mechanical engineering). Saint Petersburg, HIMIZDAT, 2004. 640 p.
2. Tushinsky L.I. *Strukturnaja teorija konstruktivnoj prochnosti materialov* (The Structural Theory of Constructive Strength of Materials). Novosibirsk, NSTU, 2004. 400 p.
3. Novikov I. I. *Teorija termicheskoy obrabotki metallov* (The theory of heat treatment of metals). Moscow, Metallurgija, 1986. 480 p.
4. Bernshtejn M. L. *Struktura deformirovannyh metallov* (The structure of deformed metals). Moscow, Metallurgija, 1977. 431 p.
5. Lahtin Yu.M., Arzamasov B.N. *Himiko-termicheskaja obrabotka metallov* (Chemical heat treatment of metals). Moscow, Metallurgija, 1985. 256 p.
6. Lysak V.I., Kuz'min S.V. *Svarka vzryvom* (Explosion Welding). Moscow, Mashinostroenie, 2005. 544 p.
7. Golkovsky M.G., Bataev I.A., Bataev A.A., Veselov S.V., Bataev V.A., Zhuravina T.V., Prikhodko E.A. Cladding of Tantalum and Niobium on Titanium by Electron Beam, Injected in Atmosphere. *Advanced Materials Research*, 2011, Vol. 314-316, pp. 23-27.
8. Zykova A.P., Novomejskij M.Yu., Kurzina I.A., Nikulina A.A., Knjazev A.S. *Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty)*, 2012, no. 4 (57), pp. 72–78.
9. Gurevich L.M., Trykov Yu.P., Pronichev D.V., Arisova V.N., Kiselev O.S., Kondrat'ev A.Yu., Pankov S.V. *Izvestija Volgograd State Technical University. Serija Problemy materialovedenija, svarki i prochnosti v mashinostroenii*, 2009, Iss. 3, no. 11(59), pp. 35–40.
10. Kobelev A.G., Lysak V.I., Chernyshev V.N., Bykov A.A., Vostrikov V.P. *Proizvodstvo metallicheskih slojstyh kompozicionnyh materialov* (Production of metal laminated composite materials). Moscow, Internet Inzhiniring, 2002. 496 p.
11. Kovalenko V.S. *Metallograficheskie reaktivy: spravochnik* (Metallographic reagents: a guide). Moscow, Metallurgija, 1981. 120 p.
12. Bataev I.A. *Struktura i mehanicheskie svojstva mnogoslojnyh materialov, sformirovannyh po tehnologii svarki vzryvom tonkolistovyh zagotovok iz nizkouglerodistoj stali*. Diss. kand. tehn. nauk [Structure and mechanical properties multilayer materials formed by explosion welding thin sheets of mild steel workpieces]. Novosibirsk, 2010. 116 p.
13. Fetisov G.P., Karpman M.G., Matjunin V.M. and al. *Materialovedenie i tehnologija metallov: uchebnik dlja studentov vuzov, obuchajushhihsja po mashinostroitel'nym special'nostjam* (Materials science and technology of metals: a textbook for students studying in machine building specialties). Moscow, Vysshaja shkola, 2000. 639 p.
14. *GOST 1497–84. Metally. Metody ispytaniy na rastjazhenie* [State Standard 1497–84. Metals. Methods of tension test], Moscow, Standartinform Publ., 2005. 22 p.
15. Bataev A.A., Bataev V.A. *Kompozicionnye materialy: stroenie, poluchenie, primenenie: Uchebnik* (Composite Materials: Structure, Production, Application: Textbook). Novosibirsk, NSTU, 2002. 384 p.
16. *GOST 9454–78. Metally. Metod ispytaniya na udarnyj 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.