

УДК 621.793.74:669.14:662.223

## ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ С ТИТАНОВЫМ СПЛАВОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОСЛОЙНОЙ ВСТАВКИ, ПОЛУЧЕННОЙ ВЗРЫВОМ

А. Н. Черепанов<sup>1</sup>, А. М. Оришич<sup>1</sup>, В. И. Мали<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 6300090 Новосибирск, ancher@itam.nsc.ru

<sup>2</sup>Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Проведено экспериментальное исследование CO<sub>2</sub>-лазерной сварки нержавеющей стали 12X18H10T и титанового сплава BT1-0 с использованием композитной вставки, полученной сваркой взрывом четырех пластин: титан (BT1-0) — тантал (ТВЧ) — медь (M1) — сталь (12X18H10T). После механической обработки вставку помещали между свариваемыми листами стали и титана и лазерным лучом осуществляли сварку встык стального и титанового листов соответственно со стальной и титановой сторонами вставки. Выполнены металлографические и спектрографические исследования, проведены испытания механических свойств полученного композитного соединения. Установлено, что после термообработки разрушение композита происходит по меди, прочность которой составляла 417 МПа.

Ключевые слова: сварка лазером, взрывом; сплавы стали, титана, тантала, меди; прочность.

Сварка титана и стали является важным процессом при производстве деталей и механизмов, в том числе и биметаллических соединений (титановый сплав — нержавеющая сталь). Сварка лазером выгодно отличается тем, что ее можно выполнять в любой среде — на открытом воздухе, в вакууме и т. д., она достаточно проста и безопасна, подходит для использования в слабодоступных местах. Малая длительность импульсов и концентрированный луч позволяют уменьшить зону термического влияния практически до нуля.

Применение сварных конструкций из титана и стали дает возможность снизить вес изделий, что в ряде случаев имеет решающее значение. Известны многочисленные исследования по сварке разнородных металлов методами проката, трения, взрыва, электронного и лазерного лучей и т. д., разработаны различные технологические приемы [1–13]. Однако задача соединения плавлением титана со сталью, в частности, аустенитного класса с помощью лазерного луча до сих пор не имеет практического решения.

Согласно диаграмме состояния системы титан — железо растворимость железа в  $\alpha$ -титане крайне мала и при нормальной температуре составляет 0.05 ÷ 0.1 %. При концен-

трации Fe в сплаве более 0.1 % образуются хрупкие интерметаллические соединения типа TiFe, TiFe<sub>2</sub>, Ti<sub>2</sub>Fe и эвтектики различного состава, которые резко снижают пластические свойства материала. Традиционные методы сварки плавлением стали с титаном дают соединения низкой прочности. Для получения прочного сварного соединения этих металлов важно выбирать такие сварочные материалы, методы и режимы сварки, при которых резко бы подавлялось или совсем предотвращалось образование хрупких фаз.

В данной работе исследуется возможность лазерного соединения нержавеющей стали 12X18H10T с титановым сплавом BT1-0 с применением композитной металлической вставки, получаемой сваркой взрывом [14–17]. Высокая ( $\approx 10^5$  с<sup>-1</sup>) скорость деформирования при соединении металлов сваркой взрывом ограничивает время химических реакций в шве, и хрупкие интерметаллиды не успевают вырасти, что позволяет достичь высокой прочности [14]. В работах [15, 18, 19] представлены результаты соединения титана со сталью комбинированными методами сварки или сваркой взрывом с применением одно- и многослойных металлических вставок. Соединения, полученные сваркой взрывом, имеют высокие прочностные и эксплуатационные свойства.

Эксперименты [11] были выполнены на автоматизированном  $\text{CO}_2$ -лазерном комплексе с технологической оснасткой, ранее используемой для сварки однородных материалов, таких как нержавеющая и углеродистая стали и сплавы на основе титана, а также для сварки титана с аустенитной сталью с применением в этом случае в качестве вставок медной и бронзовой пластин. Применение лазерной сварки для соединения указанных материалов оказалось эффективным. Установлено, что прочность сварных соединений из однородных металлов сравнима или выше прочности основного металла. Прочность на разрыв соединений титана со сталью с использованием промежуточной медной вставки  $\geq 350$  МПа. Однако соединение содержало хрупкие неметаллические соединения и имело низкую пластичность [11].

Для опытных работ были подготовлены образцы из пластин нержавеющей стали марки 12X18H10T и титанового сплава ВТ1-0. Толщина пластин 3 мм, ширина  $50 \pm 1$  мм, длина  $50 \pm 2$  мм. Сварку проводили лазерным лучом мощностью  $1.5 \div 2.4$  кВт со скоростью сварки (перемещения луча)  $0.9 \div 1.2$  м/мин. Свариваемые участки предварительно зачищали наждачной бумагой, мыли горячей водой, сушили и обрабатывали ацетоном. Поверхности свариваемых пластин сверху и снизу были защищены от окисления гелием.

В первом опыте была проведена сварка пластин титана и стали без вставок. Сварное соединение оказалось настолько хрупким, что шов разрушился на сварочном столе под действием термических напряжений. Исследования показали, что трещины проходили по хрупким интерметаллидам  $\text{FeTi}$  и  $\text{Fe}_2\text{Ti}$ , которые образовались по всей длине сварного шва (рис. 1). Поэтому в дальнейшем использовали барьерные вставки из третьего, тугоплавкого металла, например тантала, не образующего

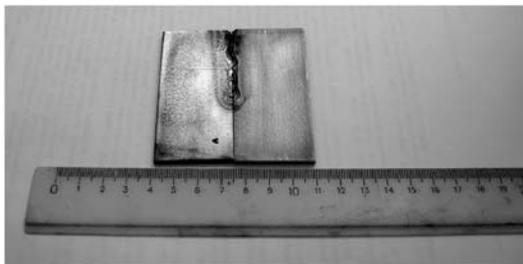


Рис. 1. Образец после лазерной сварки нержавеющей стали с титаном без вставки

при высоких температурах хрупких фаз со свариваемыми материалами.

В работе [20] представлены результаты численного расчета тепловых режимов сварки титана со сталью с промежуточной медной вставкой, из которых следует, что процесс сварки  $\text{CO}_2$ -лазерным проплавлением сопровождается образованием парового канала в зоне действия лазерного луча. Расчеты показывают, что зона плавления титана ( $1827^\circ\text{C}$ ) располагается на расстоянии  $\approx 1.2$  мм от оси луча лазера, направленного на границу контакта стальной и медной пластин. Наибольшая температура достигается на поверхности парового канала (температура кипения металла). Известно, что температура кипения нержавеющей стали  $1850^\circ\text{C}$ , меди —  $2550^\circ\text{C}$ , титана —  $2987^\circ\text{C}$ . Поскольку температура кипения тантала выше  $3000^\circ\text{C}$ , танталовая пластина не будет плавиться и ее можно использовать в качестве барьера против диффузии титана в расплав стали при лазерной сварке.

Самый простой вариант получения многослойного барьера из разнородных металлов — это получение сваркой взрывом композита титан — тантал — сталь, к которому затем можно методом лазерной сварки приваривать встык однородные металлы — титан с титаном и сталь со сталью. Однако такой способ не увенчался успехом из-за образования трещин по границе тантала со сталью. Это связано с большим различием коэффициентов расширения тантала и стали, что приводит к возникновению высоких термических напряжений. Поэтому в качестве барьера рассмотрен и исследован сваренный взрывом многослойный композит, состоящий из пластин титана (ВТ1-0) —  $100 \times 50 \times 3$  мм, тантала (ТВЧ) —  $100 \times 50 \times 0.1$  мм, меди (М1) —  $100 \times 50 \times 1$  мм, стали (12X18H10T) —  $100 \times 50 \times 3$  мм. При использовании такой четырехслойной композитной вставки соединение титана со сталью сводится к лазерной сварке однородных металлов: титан — титан и сталь — сталь, хотя для такой простой задачи подошли бы и другие методы сварки.

Сварку вышеперечисленных разнородных металлов в виде пластин осуществляли за один взрыв, как в работе [21]. Пластины нержавеющей стали располагали на неподвижном стальном основании и над ней устанавливали с зазорами параллельно друг другу остальные пластины в последовательности: медь, тантал, ти-

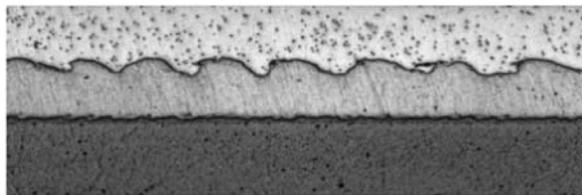


Рис. 2. Сваренная взрывом вставка: нержавеющая сталь, медь, тантал, титан (сверху вниз; слой тантала толщиной 0.1 мм плохо виден)

тан. Непосредственно на титановой пластине размещали равномерно слой взрывчатого вещества (аммонит № 6ЖВ со скоростью детонации 3 км/с), который инициировали детонатором из одного угла заряда. Продукты детонации ускоряли титановую пластину, она соударялась под углом с пластиной тантала, затем осуществлялось косое соударение этого двухслойного пакета с медной пластиной и полученного трехслойного пакета со стальной пластиной, неподвижно лежащей на жестком основании. В результате таких высокоскоростных косых неупругих соударений металлов происходила их сварка и образовалась четырехслойная заготовка Ti—Ta—Cu—сталь, микрофотография шлифа которой представлена на рис. 2.

От четырехслойной заготовки отрезали полоску шириной, равной толщине подлежащих лазерной сварке пластин, проводили необходимую зачистку и обработку поверхностей свариваемых деталей. Подготовленную вставку помещали между пластинами и осуществляли лазерную сварку встык (см. рис. 2) стальной пластины со стальной частью вставки, а титановой пластины — с титановой частью вставки, аналогично работе [12].

На рис. 3 представлены фотографии образцов лазерного соединения нержавеющей стали 12Х18Н10Т с титановым сплавом ВТ1-0 с использованием многослойной композитной вставки, полученной сваркой взрывом.

Испытания образцов на прочность при статическом растяжении проводили на машине ИР 5113-100 согласно ГОСТ 1497-84. В таблице приведены осредненные значения механических испытаний четырех образцов, прошедших и не прошедших термообработку в вакуумной печи. Видно, что применение термообработки заметно увеличивает временную прочность и пластичность соединения. Следует отметить, что разрушение соединения происходило по медной пластине. Поскольку прочность исход-

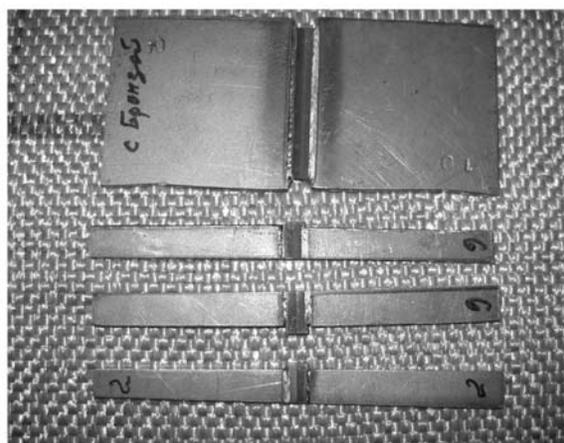


Рис. 3. Образцы сваренных лазером встык пластин титана и нержавеющей стали с противоположных сторон композитной вставки (в центре), сваренной взрывом

Механические характеристики контрольного и опытного образцов

Предел временной прочности $\sigma_v$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
Без термообработки		
373.4	250.4	3.4
С термообработкой, 1 ч при 300 °С в вакууме		
417.42	213.26	5.25

ной меди марки М1 составляет 220 ÷ 240 МПа, то более высокое значение прочности полученного соединения можно объяснить деформационным упрочнением (наклепом) меди в процессе сварки взрывом и частично — легированием компонентами тантала, которые перемешаны с медью. Это видно из спектроскопического анализа приграничной зоны тантал — медь (рис. 4). В окрестностях границы соединения тантал — медь в меди обнаружено свыше 30 % ат. тантала, что способствует существенному увеличению ее прочностных свойств. На рис. 5, 6 представлены микрофотографии приграничных зон медь — сталь и тантал — титан. Видно, что образовалась достаточно широкая (110 ÷ 128 мкм) зона взаимопроникновения металлов с характерной волнистой границей с содержанием меди в стали свыше 56 % ат. (см. рис. 5). На границе контакта тантал — титан зона перемешивания более

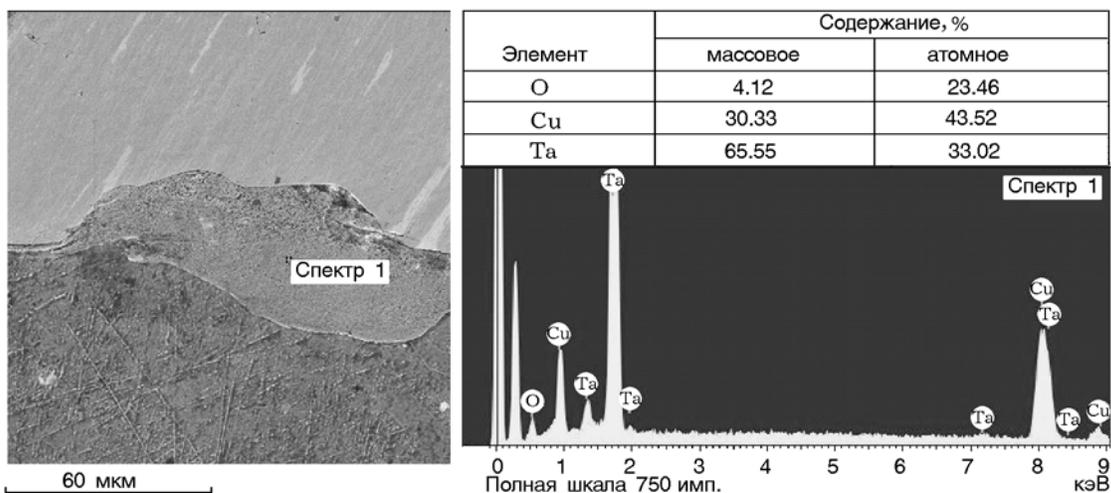


Рис. 4. Спектроскопический анализ приграничной зоны тантал — медь

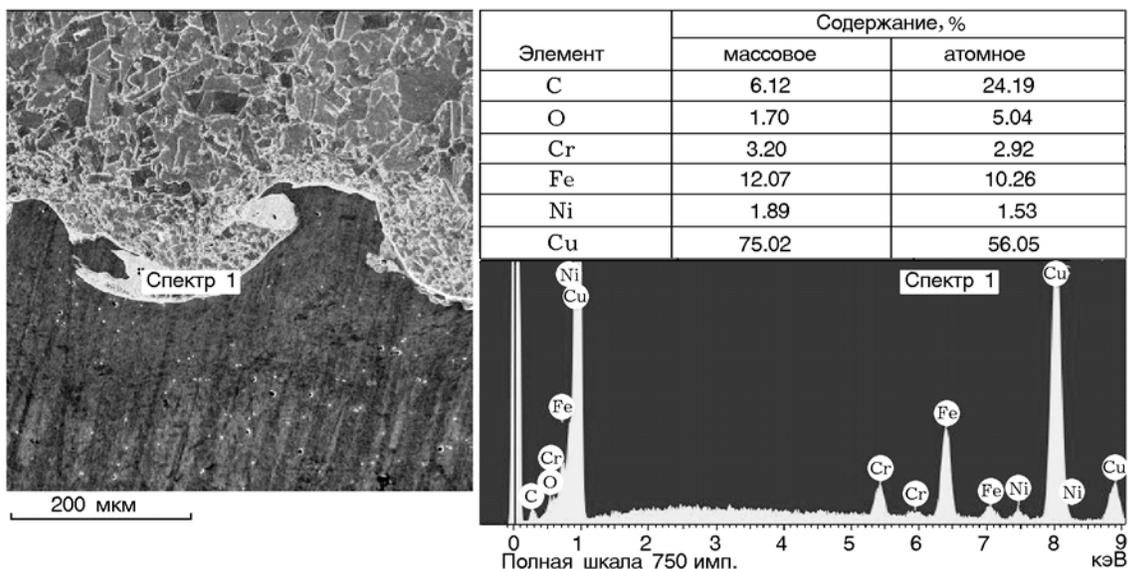


Рис. 5. Спектроскопический анализ приграничной зоны медь — сталь

узкая (<18 мкм), содержание тантала в титане выше 9 % ат.

Следует отметить, что приведенные данные получены на травленых образцах и количественные значения элементов могут несколько отличаться от их значений для нетравленых образцов. В области, где произошло перемешивание тантала и меди, наблюдается резкий скачок микротвердости, на отдельных участках — до 2 800 МПа [22].

Поскольку разрушение многопластинчатой композитной вставки происходило по меди, была сделана попытка заменить ее более прочной бронзой марки БрБ2. С помощью свар-

ки взрывом получен композит состава ВТ1-0—Та—БрБ2—сталь. Однако при последующей лазерной сварке происходило растрескивание как стыка тантал — бронза, так и самой бронзовой пластины. Поэтому бронза марки БрБ2 не может использоваться в составе композиционного диффузионного барьера при повышенной температуре.

### ВЫВОДЫ

Использование сварки взрывом пластин титана, тантала, меди и стали (ВТ1-0—Та—М1—12Х18Н10Т) для формирования композитной вставки, которую располагают на грани-

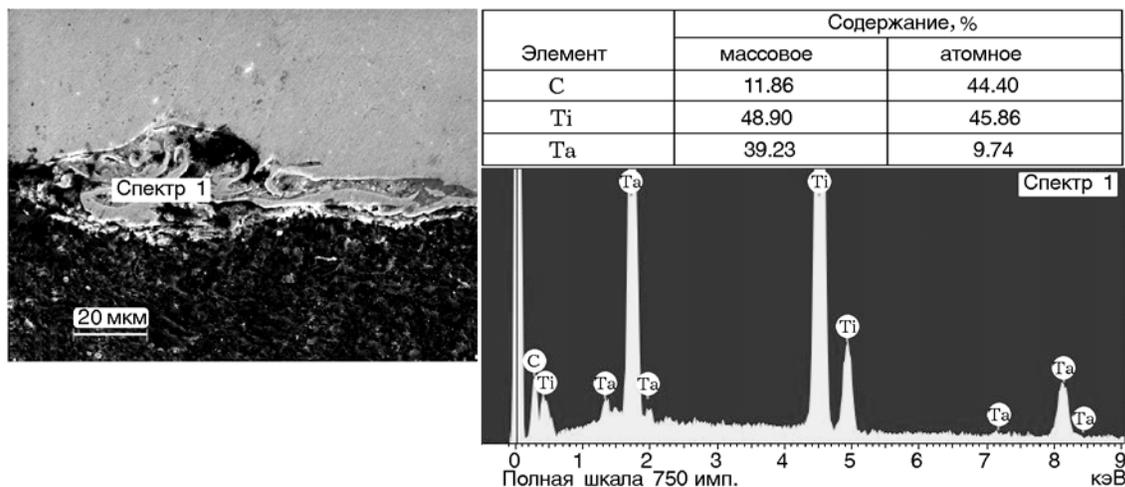


Рис. 6. Спектроскопический анализ приграничной зоны тантал — титан

це сварки лазерным лучом титана и аустенитной стали, позволяет получить сварной композит с прочностью соединения, сопоставимой с прочностью титанового сплава ВТ1-0. При этом лучший результат по прочности на разрыв ( $\sigma_{\text{в}} = 417$  МПа) получен после термической обработки композита. Замена меди в композиционном барьере на сплав БрБ2 нецелесообразна из-за его низких прочностных свойств при повышенной температуре.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Рябкин Д. М., Рябов В. Р., Гуревич С. М.** Сварка разнородных металлов. — Киев: Техника, 1976.
2. **Металлургия** и технология сварки титана и его сплавов / под ред. С. М. Гуревича. — Киев: Наук. думка, 1979.
3. **Metzeg G., Lison R.** Electron beam welding of dissimilar metals // *Welding J.* — 1976. — V. 55, N 8. — P. 230–240.
4. **Седых В. С., Казак Н. Н.** Сварка взрывом и свойства сварных соединений. — М.: Машиностроение, 1971.
5. **Сидякин В. А., Арбузов В. М., Хорстов В. С.** Стыковая сварка разнородных металлов в инертной среде низкого давления // *Мир техники и технологий.* — 2009. — № 10. — С. 40–45.
6. **Rathod M., Kutsuma M.** Laser rollbonding of A5052 aluminium alloy and SPCC steel // *Quart. J. Jap. Weld. Soc.* — 2003. — N 2. — P. 282–294.
7. **Калеко Д. М.** Современные способы сварки алюминиевых сплавов со сталями // *Автомат. сварка.* — 2012. — № 10 (714). — С. 29–36.
8. **Быковский О. Г., Рябов В. Р.** Проблемы сварки титана со сталью // *Автомат. сварка.* — 1984. — № 4. — С. 34–36.
9. **Быковский О. Г., Пеньковский И. В., Рябов В. Р.** О механизме образования промежуточной прослойки при сварке титана со сталью // *Автомат. сварка.* — 1991. — № 11. — С. 22–24.
10. **Черепанов А. Н., Афонин Ю. В., Маликов А. Г., Оришич А. М.** О применении нанопорошков тугоплавких соединений при лазерной сварке и обработке материалов // *Тяжелое машиностроение.* — 2008. — № 4. — С. 25–26.
11. **Черепанов А. Н., Афонин Ю. В., Оришич А. М.** Лазерная сварка стали с титановым сплавом с применением промежуточных вставок и нанопорошковых инокуляторов // *Тяжелое машиностроение.* — 2009. — № 8. — С. 24–26.
12. **Черепанов А. Н., Оришич А. М., Мали В. И., Дроздов В. О.** Свойства сварных соединений титана с нержавеющей сталью с применением металлических вставок // Докл. V Всерос. конф. «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине», Новосибирск, 26–29 марта 2013. — Новосибирск: Параллель, 2013. — С. 272–274.
13. **Afonin Yu. V., Orishich A. M., Cherepanov A. N.** Welding of titanium and aviation aluminum-lithium alloy by the CW CO<sub>2</sub>-laser beam // *Abstr. 29th Intern. Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO 2010)*, USA, Anaheim, 26–30 September 2010. — Anaheim, CA, 2010. — Paper 1201.
14. **Дерибас А. А.** Физика упрочнения и сварка взрывом. — Новосибирск: Наука, 1972.
15. **Седых В. С., Казак Н. Н.** Сварка взрывом и свойства сварных соединений. — М.: Машиностроение, 1971.
16. **Pearson J.** Recent advances in explosive pressing and welding // *Amer. Soc. Metals.* — Chicago,

1959. — P. 32–36. — (2nd Metals Eng. Conf. of Explosive).
17. **Philipchuk V.** Explosive welding status // Creative Manufacturing Seminar. — ASTM Paper. — April, 1965. — P. 65–109.
  18. **Захаренко И. Д.** Сварка металлов взрывом. — Минск: Наука и техника, 1990.
  19. **Деформация металлов взрывом** / А. В. Крупин, В. Я. Соловьев, Н. И. Шефтель, А. Г. Кобелев. — М.: Металлургия, 1975.
  20. **Шапеев В. П., Черепанов А. Н., Исаев В. И.** Моделирование теплофизических процессов лазерной сварки пластин из разнородных сплавов с применением промежуточной вставки // Докл. V Всерос. конф. «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине», 26–29 марта, 2013. — Новосибирск: Параллель, 2013. — Т. II. — С. 192–198.
  21. **Bataev I. A., Bataev A. A., Mali V. I., Esikov M. A., Bataev V. A.** Peculiarities of weld seams and adjacent zones structures formed in process of explosive welding of sheet steel plates // Mater. Sci. Forum. — 2011. — V. 673. — P. 95–100.
  22. **Mali V. I., Bataev I. A., Bataev A. A., Maljutina Y. N., Esikov M. A., Lozhkin V. S.** Microstructure and mechanical properties of copper-tantalum joints produced by explosive welding // The 8th Intern. Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST 2013), Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June–1 July 2013. — Mongolia: MUST, 2013. — P. 9–12.

*Поступила в редакцию 29/VII 2013 г.,  
в окончательном варианте — 13/XII 2013 г.*

---