

А. Н. Ву Ван, В. О. Харламов, Д. В. Россеин, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ ЗОНЫ СОЕДИНЕНИЯ
В ОБРАЗЦАХ БИМЕТАЛЛА АЛЮМИНИЙ-МЕДЬ, ПОЛУЧЕННОГО
СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ ВБЛИЗИ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ СВАРИВАЕМОСТИ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: avuvan@mail.ru, harlamov_vo@mail.ru, RosseinD8@yandex.ru,
weld@vstu.ru, lysak@vstu.ru

В работе представлены результаты сравнения микроструктуры и количественной фрактографии зоны соединения биметалла медь-алюминий методами сканирующей электронной микроскопии. Содержание компонентов в изломе образцов после механических испытаний рассчитывали как отношение площади видимых контрастных областей к общей площади электронного изображения. Выявлено, что при образовании равнопрочного сварного соединения между медью и алюминием вблизи нижней границы свариваемости (W_2 от 0,17 до 0,24 МДж/м²) содержание оплавов в изломе снижается от 55–63 % до 27–21 % при неизменном линейном содержании оплавов равном 56–67 %. При этом количество областей алюминия увеличивается с 34–36 % до 57–73 %, что говорит о смещении зоны разрушения от оплавов вглубь алюминия с изменением преимущественного характера разрушения с хрупкого на вязкий.

Ключевые слова: сварка взрывом, зона соединения, оплав, равнопрочность, химический анализ, фрактография, излом, характер разрушения

A. N. Vu Van, V. O. Kharlamov, D. V. Rossein, S. V. Kuz'min, V. I. Lysak

**INVESTIGATION OF THE NATURE OF THE FRACTURE OF THE JOINT ZONE
IN SAMPLES OF ALUMINUM-COPPER BIMETAL OBTAINED
BY EXPLOSION WELDING NEAR THE LOWER LIMIT OF WELDABILITY**

Volgograd State Technical University

The paper presents the results of quantitative fractography of the copper-aluminum bimetal junction using scanning electron microscopy. The component content in the fracture of the samples after mechanical testing was calculated as the ratio of the area of the visible contrast areas to the total area of the electronic image. It was found that when an equal-strength welded joint is formed between copper and aluminum near the lower limit of weldability (W_2 from 0.17 to 0.24 MJ/m²), the melt content in the fracture decreases from 55–63 % to 27–21 % with a constant linear melt content of 56–67 %. At the same time, the number of aluminum regions increases from 34–36 % to 57–73 %, which indicates a shift in the fracture zone from the melts deeper into the aluminum with a change in the predominant fracture pattern from brittle to viscous.

Keywords: explosion welding, joint zone, melting zone, strength, chemical analysis, fractography, fracture, the nature of destruction

© Ву Ван А. Н., Харламов В. О., Россеин Д. В., Кузьмин С. В., Лысак В. И., 2025.

Авторы статьи выражают благодарность центру коллективного пользования «Физико-химические методы исследования» ВолгГТУ за проведение исследований на электронном микроскопе FEI Versa 3D.

Введение

Биметалл медь-алюминий предназначен для изготовления из него контактных переходников и токоведущих элементов электротехнического назначения с улучшенным комплексом физико-механических характеристик. Применение данного материала делает возможным обеспечение идеального электрического контакта [1–5]. Однако, между медью и алюминием возможно образование хрупких интерметаллидов при локальном оплавлении в результате соударения, препятствующих формированию качественного биметалла. Поэтому целью работы было изучение влияния содержания оплавов на механические свойства и характер разрушения в зоне соединения образцов биметалла полученного при

сварке взрывом меди с алюминием вблизи нижней границы свариваемости.

Материалы и методы исследования

В опытах использовались листы меди толщиной 2,5 мм и алюминия толщиной 4 мм марок М1 и АД1 соответственно (табл. 1). Для сварки взрывом меди с алюминием применялась классическая плоскопараллельная схема соударения двух пластин (рис. 1). Режимы сварки в опытах обеспечивали пересечение нижней границы свариваемости за счет изменения угла соударения γ от $8,95^\circ$ до $12,5^\circ$ при постоянной скорости точки контакта $V_k = D = 1750$ м/с (рис. 2) [7] при этом энергия пластических деформаций W_2 изменялась в диапазоне значений от 0,12 до 0,24 МДж/м².

Таблица 1

Характеристики используемых материалов

Марка	Химический состав, мас. %										σ_b , МПа
	Fe	Ni	S	As	Pb	Zn	Cu	Al	Mn	Ti	
М1	до 0,005	до 0,002	до 0,004	до 0,002	до 0,005	до 0,004	$\geq 99,9$	–	–	–	220
АД1	–	–	–	–	–	до 0,1	до 0,05	≥ 99	до 0,05	до 0,05	90

Скорость детонации взрывчатого вещества D контролировалась электроконтактным методом [9] с помощью прибора для измерения микросекундных интервалов времени КТБ «Интер-

вал». В качестве взрывчатого вещества использовалась смесь аммонита 6ЖВ с кварцевым песком в соотношении 50/50.

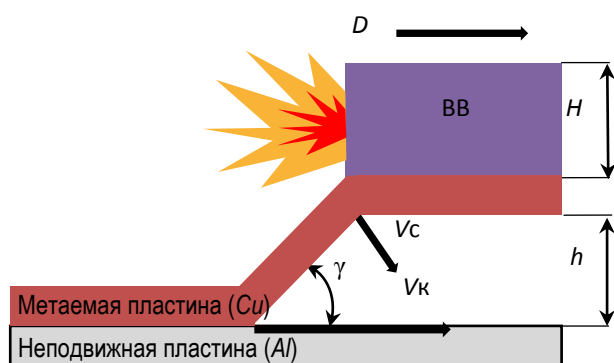


Рис. 1. Схема соударения пластин при сварке взрывом: ВВ – взрывчатое вещество (аммонит 6 ЖВ+песок); D – скорость детонации; V_k – скорость точки контакта; V_c – скорость соударения; γ – угол соударения; H – высота заряда; h – высота зазора

Механические испытания сваренных взрывом биметаллов проводили на отрыв слоев образцов – выдавок [8] согласно ОСТ 5.9311–78 на разрывной машине Р-20 (рис. 3, а). Заготовки под образцы вырезались из центра полученных пластин, количество вырезанных элементов на

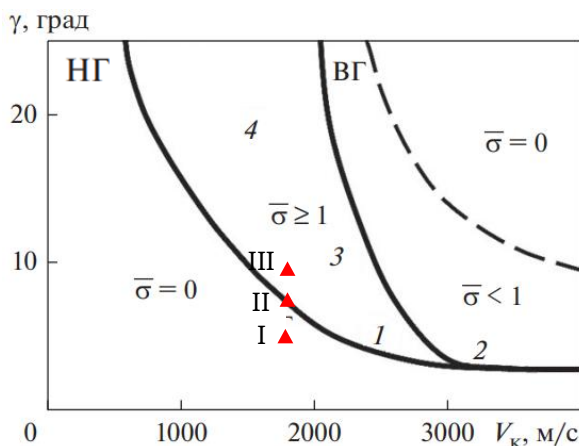


Рис. 2. Область свариваемости меди с алюминием при сварке взрывом [7]: НГ – нижняя граница, ВГ – верхняя граница. Римскими цифрами обозначены режимы сварки, использованные в опытах

одну пластину композита составляет 4 штуки, из которых один используется для подготовки микрошлифа, а оставшиеся три для подготовки образцов для механических испытаний на отрыв слоев (рис. 3, б).

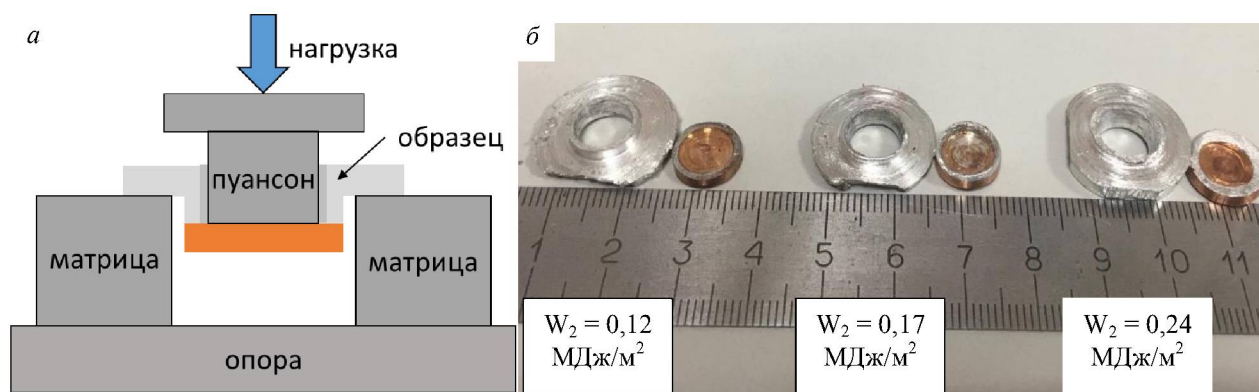


Рис. 3. Схема проведения механических испытаний на отрыв слоев биметалла (а) и внешний вид образцов-выдавок после разрушения (б)

Микроструктура и характер разрушения зоны соединения образцов после механических испытаний исследованы на растровом электронном микроскопе *Versa 3D, FEI*, Чехия, с применением детектора обратно-отраженных электронов (*CBS*), позволяющем получать изображение с высоким контрастом по атомному номеру элемента Z ($\text{Cu} - 29$, $\text{Al} - 13$) при низкой чувствительности к рельефу образца. Таким образом области электронной фотографии соответствующие чистой меди будут ярко белого цвета, алюминию – темного, а оплавам – серого цвета. Содержание элементов и их рас-

пределение поперек границы соединения получены с помощью системы энерго-дисперсионного анализа *Oxford AZtecLive Expert* с детектором *Ultim Max 65*. Процентное содержание компонентов (алюминий, медь, оплав) в зоне соединения разрушенных при механических испытаниях образцов определяли на медной и алюминиевых сторонах выдавок по разнице контраста как отношение площади включений (рис. 4, а) к общей площади электронного изображения с помощью инструмента *Threshold* программы *ImageJ v1.52* (рис. 4, б).

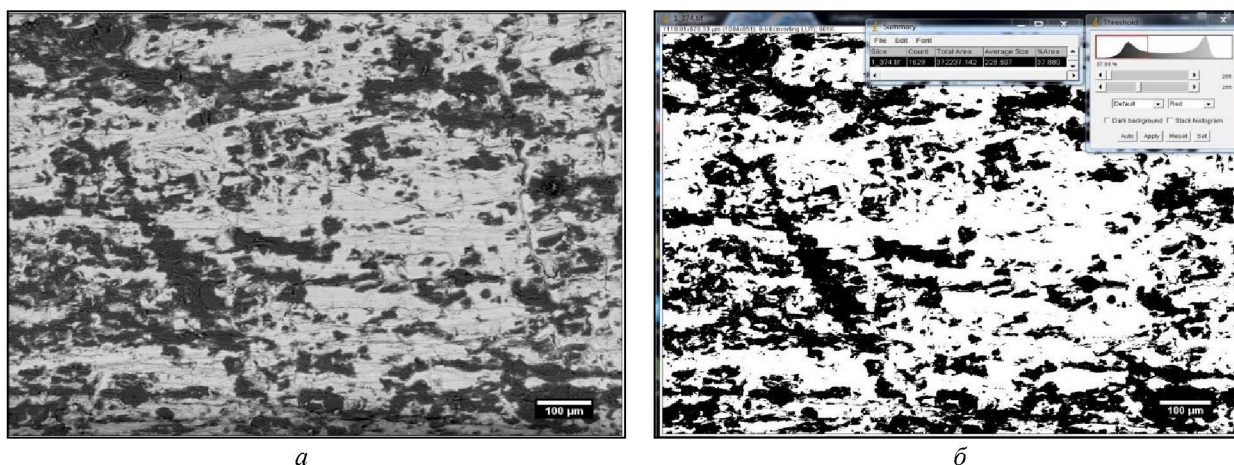


Рис. 4. Методика определение содержания компонентов в зоне разрушения:
а – поверхность медной части образца-выдавки после разрушения в ходе механического испытания;
б – результат обработки электронного изображения с помощью инструмента *Threshold* в программе *ImageJ v1.52*

Количественное содержание оплавов вдоль линии соединения определяли линейным методом при обработке в той же программе электронных фотографий полученных на микрошлифах.

Полученные результаты и их обсуждение

Исследование микроструктуры показало, что зона соединения меди с алюминием в исследованном диапазоне низких энергий являет-

ся безволновой (рис. 5, а–в). Однако несмотря на крайне малые энергозатраты, в образце полученном на режиме ниже нижней границы свариваемости ($0,12 \text{ МДж/м}^2$) обнаружены оплавы в количестве 15 %, имеющие мелкодисперсное двухфазное строение (рис. 6, а).

При повышении энергии W_2 с $0,12$ до $0,17$ и $0,24 \text{ МДж/м}^2$ содержание оплавов скачкообразно увеличивается до 56 и 57 % соответственно (рис. 5, б, в), а соотношения элементов в оплавах Al/Cu изменяется от 80/20 до 50/50 ат. % (рис. 6, а–в).

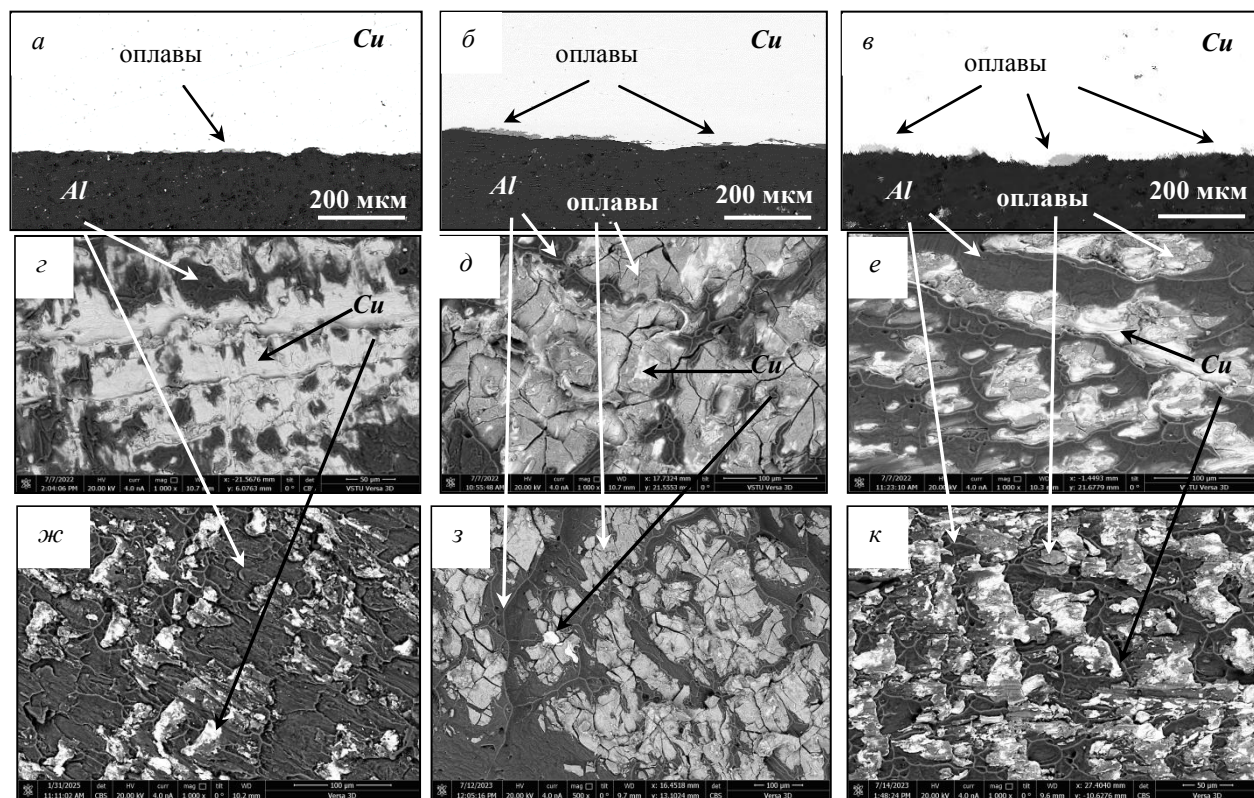


Рис. 5. Микроструктура образцов биметалла $Cu-Al$ при энергиях W_2 [МДж/м^2] $0,12$ (а); $0,17$ (б); $0,24$ (в) и соответствующая им фрактография зоны соединения со стороны меди (г, д, е) и со стороны алюминия (ж, з, к)

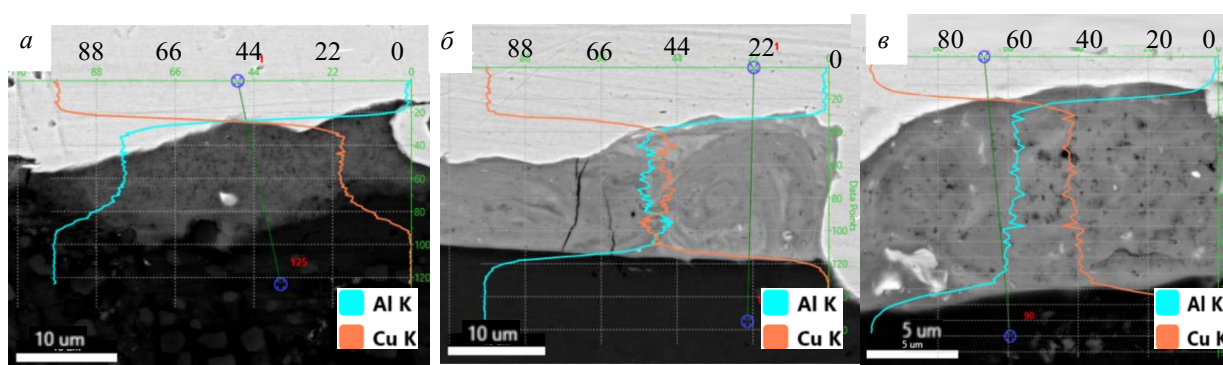


Рис. 6. Микроструктура и распределение элементов внутри оплавов в зоне соединения биметалла $Cu-Al$, полученного вблизи нижней границы свариваемости взрывом при энергиях W_2 (МДж/м^2) $0,12$ (а); $0,17$ (б); $0,24$ (в)

Сопоставление данных EDS анализа с известной диаграммой состояния алюминий-медь [10] позволяет предположить, что при сварке взрывом на режиме ниже нижней границы свариваемости образуются участки локального оплавления, имеющие фазы $(Al)+\theta$ (твёрдый рас-

твор на основе соединения $CuAl_2$) и состав близкий к эвтектическому (рис. 6, а) с температурой плавления 548°C . Однако механические испытания на отрыв слоев показали, что энергии пластической деформации равной $0,12 \text{ МДж/м}^2$ недостаточно для образования

прочного соединения. В изломе (рис. 5 *г, ж*) наблюдаются гладкая поверхность меди и отдельные участки прихвачившегося алюминия, что указывает на то, что отрыв в основном произошёл по межфазной границе, на которой не

возникло условий для создания прочного соединения между свариваемыми металлами. Отсутствие оплавов в изломе говорит о том, что они находятся внутри участков прихвачившегося алюминия на границе с медью.

Таблица 2

Параметры режимов сварки взрывом, содержание оплавов и механические свойства биметалла медь-алюминий

№	W_2 , МДж/м ²	$D=V_{кз}$, м/с	V_c , м/с	γ , °	σ , МПа	Кол-во оплав., %	Кол-во компонентов в изломе, %					
							Со стороны меди			Со стороны алюминия		
							Al	Cu	Оплав	Al	Cu	Оплав
I	0,12	1700±50	202	8,95	0	15	38	62	—	92	8	—
II	0,17	1700±50	245	10,9	88	56	34	11	55	36	1	63
III	0,24	1700±50	285	12,5	89	57	57	16	27	73	6	21

Повышение энергии W_2 до 0,17 МДж/м² приводит к росту содержания оплавов вдоль линии соединения до 56 % и увеличению содержания меди в некоторых из них (рис. 6, б) до значений соответствующих η -фазе (на основе соединения $AlCu$). Однако механические свойства на отрыв слоев соединения достигают значений равнопрочности. На поверхности разрушенного образца –выдавки (рис. 5 д, з) обнаружены обширные области оплавленного металла, покрытые сеткой трещин и малые островки чистой гладкой меди. Участки приварившегося алюминия, в отличие от образца № I полученного на режиме ниже нижней границы свариваемости, теперь имеют характерный вид вязкого разрушения при близком процентном содержании по площади излома (табл. 2). Это свидетельствует о том, что основная область разрушения теперь проходит по оплавам и имеет хрупкий характер.

При параметрах сварки взрывом соответствующих энергии W_2 равной 0,24 МДж/м² происходит вовлечение в процессы совместной пластической деформации более глубоких слоев соударяемых металлов [7] при неизменном линейном содержании оплавов (57 %). Содержание элементов Al/Cu равно 60/40 ат. % (рис. 6, б) соответствует двухфазной области диаграммы $\eta+\theta$. При механических испытаниях соединение также оказалось равнопрочным (табл. 2). В изломе (рис. 5, е, к) теперь преобладают участки вязкого разрушения по алюминию (до 73 %). Внутри видимых участков оплавленного металла отсутствуют трещины, а их количество снизилось с 55–63 % до 21–27 %.

Выводы

При фрактографических исследованиях сваренных взрывом образцов биметалла медь-алюминий после механических испытаний выявлено, что при достижении равнопрочности вблизи нижней границы свариваемости разрушение в основном проходит по оплавам (55–63 %) и имеет хрупкий характер с сеткой трещин, доля вязкого разрушения по алюминию составляет 34–36 %. Повышение энергии пластических деформаций W_2 от 0,17 до 0,24 МДж/м² приводит к снижению содержания оплавов в изломе до 21–27 %, а доля вязкого разрушения по алюминию возрастает до 57–73 %. Отсутствие изменения линейного содержания оплавов в микроструктуре при двукратном снижении содержания оплавов в изломе свидетельствует о смещении зоны разрушения образцов биметалла вглубь алюминия и изменении преимущественного характера излома с хрупкого на вязкий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергосберегающие композиционные элементы токоподводящих узлов силовых электрических цепей / Е. А. Чугунов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак и др. // Энергетик. – 2001. – № 9.
2. Новые биметаллические переходные элементы для силовых электрических цепей / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Ю. Г. Долгий и др. // Энергетик. – 1995. – № 4.
3. Новые конструкции токоподводящего узла катодной секции электролизера алюминия / А. П. Пеев, С. В. Кузьмин, Лысак В. И. и др. // Цветные металлы. – 2002. – № 8.
4. Техничко-экономическая эффективность применения новых конструкций композиционных токоподводов электролизера алюминия / А. П. Пеев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак и др. // Вестник машиностроения. – 2004. – № 6.
5. Физические основы и области практического применения сварки металлов взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузь-

мин, А. Н. Кривенцов, В. И. Кузьмин // Наука производству. – 2005. – № 1.

6. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2009616788 от 7 дек. 2009 г. РФ Программное обеспечение расчета параметров взаимодействия разнородных металлов при импульсном нагружении (сварка взрывом) / С. В. Хаустов, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин ; ВолгГТУ. – 2009.

7. *Лысак, В. И.* Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – Москва : Издательство «Машиностроение-1», 2005. – 544 с.

8. *Кузьмин, В. И.* Методики испытаний сваренных

взрывом композиционных материалов : учеб. пособие / В. И. Кузьмин, С. В. Кузьмин, А. П. Пеев ; В. И. Кузьмин, С. В. Кузьмин, А. П. Пеев ; М-во образования и науки Российской Федерации, Волгоградский гос. технический ун-т. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2011. – 65 с.

9. Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович [и др.]. – 2-е издание, переработанное. – Москва : Главная редакция физико-математической литературы Издательства «Наука», 1975. – 704 с.

10. *Лякишев, Н. П.* Диаграммы состояния двойных металлических систем: справ. : в 3 т. / Н. П. Лякишев. – М. : Машиностроение, 1996. – Т. 1. – С. 992.