

3. В. А. Веретенников, А. Н. Дремин, А. Н. Михайлов. ФГВ, 1966, 2, 3.
4. А. М. Каплан, Д. П. Кирюхин и др. Химия высоких энергий, 1969, 3, 5, 460.
5. А. М. Каплан, Д. П. Кирюхин и др. Докл. АН СССР, 1970, 190, 6, 1387.
6. I. M. Vaghalov, D. P. Kiryuchin et al. 3rd Symposium on Radiation Chemistry, Tihany, Hungary, B/25, 1971.
7. Л. В. Альтшuler, И. М. Баркалов и др. Химия высоких энергий, 1968, 2, 88.
8. R. M. Joshi. J. Polym. Sci., 1968, 56, 313.
9. A. J. Restaino, R. B. Mesrobian. J. Amer. Chem. Soc, 1956, 78, 13, 2939.
10. A. Chapiro, M. Zumeg. J. Chim. Phys., 1965, 62, 9, 947.

УДК 661.791.1

## СВАРКА ВЗРЫВОМ СВИНЦА С НЕКОТОРЫМИ МЕТАЛЛАМИ И СПЛАВАМИ

И. В. Яковлев

(Новосибирск)

Получение прочного соединения свинца с различными металлами и сплавами представляет определенный теоретический и практический интерес. Свинец из-за своей низкой прочности с большим трудом может быть использован как конструкционный материал, поэтому биметалл, состоящий из свинца с каким-либо другим металлом или сплавом, может быть с успехом использован, например, для создания аппаратов, работающих в агрессивных средах. Способность свинца поглощать радиоактивное излучение может быть использована для изготовления соответствующей защитной аппаратуры из различных металлов, плакированных свинцом. Соединения свинца с такими металлами, как медь и ниобий, представляют интерес и с metallургической точки зрения, поскольку по диаграммам состояния [1] с подобными металлами свинец не образует в обычных условиях ни твердых растворов, ни химических соединений.

### Обзор известных способов соединения металлов со свинцом

До последнего времени соединение больших поверхностей свинца с различными металлами и сплавами осуществлялось способами, которые, как правило, не обеспечивали свойств, интересующих технику. В частности, прочность сцепления слоев получаемых двухслойных материалов оказывалась очень низкой. К известным способам соединения металлов со свинцом относятся: способ заливки, электролитический способ, а также менее распространенный способ плазменного напыления.

**Способ заливки.** При этом способе пластина металла, соединяемого со свинцом, нагревается до температуры 300°C, а поверхность, на которую будет нанесен свинец, должна быть предварительно покрыта специальной эмульсией или слоем никеля толщиной в несколько микрон, нанесенного, например, электролитически. Подготовленная таким образом поверхность заливается расплавленным свинцом. Можно отметить следующие недостатки этого способа:

1) при заливке, как правило, появляется усадочная раковина, которая влечет за собой увеличение «прибыльной» части и соответственно перерасходу свинца примерно на 30%;

2) нанесенный слой свинца имеет пористую структуру и для того, чтобы устранить дефекты литья, требуется дополнительная механическая обработка;

3) обычно не обеспечивается гарантированное сцепление свинцового слоя с другим металлом и зачастую в некоторых местах наблюдаются отслоения.

**Электролитический способ** заключается в электролитическом осаждении свинца на поверхность другого металла. Недостатки этого способа:

1) большой расход электроэнергии;

2) процесс осаждения является весьма длительным. Например, для нанесения слоя свинца толщиной 5 мм на единицу поверхности требуется более 250 часов;

3) на участках поверхности, имеющих острые кромки или вмятины, начинают бурно расти зерна свинца, имеющие форму дендритов, что вызывает большой расход свинца (около 50% свинца идет на образование дендритов). При этом образовавшаяся игольчатая поверхность требует дополнительной механической обработки. При испытании образцов на отрыв, разрушение происходит, как правило, по границе раздела, т. е. прочность соединения оказывается меньшей, чем прочность свинца.

### Сварка взрывом

В работе [2], выполненной в Институте гидродинамики СО АН СССР, рассмотрено соединение свинца с медью непосредственно, а также свинца со сталью через медный промежуточный слой способом сварки взрывом. Авторы этой работы предпринимали попытки получить также соединение свинца со сталью непосредственно. Для этого использовались различные взрывчатые вещества (ВВ) и различные режимы соударения. Эксперименты показали, что необходимо использовать слабые смеси порошкообразных ВВ с большим содержанием селитры. В частности, для сварки свинца толщиной от 1 до 8 мм использовалось ВВ со скоростью детонации около 2 км/сек. В то же время исследования [2] показали, что даже в этом случае прямого соединения свинца со сталью получить не удается и на поверхности стали остается лишь небольшой налет свинца. При этом сказываются, по-видимому, существенные различия свойств этих металлов, в частности прочность и температура плавления. В используемых в [2] режимах соударения свинец находится в пластическом состоянии, а сталь этого состояния еще не достигает. Сильный нагрев в зоне контакта уменьшает прочность свинца, развитое волнообразование по границе соединения отсутствует.

При соединении свинца с медью наблюдалось развитое волнообразование, прочность соединения превышала прочность свинца.

**Соединение свинца с медью.** Нами также было получено соединение свинца с медью в режимах, описанных в работе [2]. В работе [2] приведены результаты исследования соединения свинец — медь с помощью рентгеноструктурного анализа. Последний показал появление новых линий на рентгенограмме, отличных от линий свинца и меди.

В работе [3] было сделано предположение, что при сварке взрывом образуется новая фаза, на основе свинца и меди. Диаграмма со-

стояния [1] системы свинец — медь не дает растворов свинца в меди ни в твердом, ни в жидким состоянии. Предполагается, что образуется новое соединение типа интерметаллида в системе Pb — Cu. Исследовать свойства полученного интерметаллида не удалось из-за того, что он синтезируется в очень небольших количествах.

**Использование промежуточных слоев.** В ряде случаев при сварке свинца с некоторыми металлами приходится использовать промежуточный слой. Это объясняется тем, что для большинства металлов и сплавов бывает затруднительно получить сваркой взрывом прочное соединение со свинцом при непосредственной их сварке подобно случаю сталь — свинец.

Как было установлено при анализе соединения свинца со сталью в результате высоких давлений и повышенных температур, возникающих в зоне контакта при сварке взрывом между двумя металлами, могут образовываться хрупкие соединения, не позволяющие получить качественное сцепление слоев. В частности, выше отмечалось образование интерметаллида при соединении свинца с медью. Чтобы избежать подобных нежелательных явлений, необходимо, исходя из каждого конкретного случая, использовать определенный промежуточный слой, который бы хорошо соединялся со свинцом и не образовывал бы хрупких соединений с другим металлом пары. В этом плане и были рассмотрены возможности соединения свинца с различными металлами и сплавами.

Сварка взрывом осуществлялась по известной схеме рис. 1. Так как свинец является металлом со скоростью звука несколько большей одного километра в секунду, то по критериям сварки взрывом [4] для осуществления сварочного режима необходимо, чтобы скорость

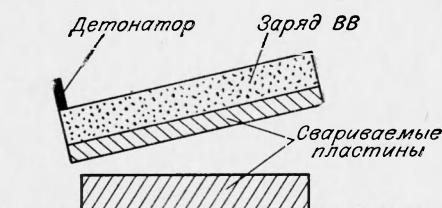


Рис. 1. Схема сварки взрывом.

точки контакта не превышала скорость звука в свинце. Это условие обеспечивается использованием ВВ с низкой скоростью детонации. В качестве ВВ использовалась смесь аммонита с аммиачной селитрой в отношении 1 : 3 с плотностью 0,9 г/см<sup>3</sup> и скоростью детонации порядка 2000 м/сек. Для предохранения поверхности свинца от разрушающего

действия ВВ использовались защитные прокладки из резины или пластика толщиной от 3 до 5 мм.

Качественные соединения со свинцом исследовались металлографически и для них проводились механические испытания по методике, изложенной в работе [4]. Все полученные соединения подвергались рентгенографическому анализу. Рентгенографические исследования зоны соединения проводились с помощью фотографического метода на аппарате УРС-60 с медным излучением в камере РКД и ионизационным методом на аппарате ДРОН-1 с железным излучением. Образцы изготавливались постепенным стравливанием свинцового слоя до границы соединения. Одновременно, чтобы исключить ошибки, рентгенографировались исходные образцы свариваемых металлов. Сварку свинца осуществляли со следующими металлами: медь, алюминий, латунь, сталь, титан, ниобий и цирконий.

На рис. 2 представлена микроструктура соединения латуни марки ЛО-60 со свинцом марки С1 и распределение микротвердости. Свинец толщиной 1,5 мм метался зарядом ВВ толщиной 22 мм. Твердость свинца возросла с 6 до 8 HV за счет упрочнения в ударной вол-

не. Механические испытания позволили установить, что  $\sigma_{cp} = 1,4 \text{ кг}/\text{мм}^2$ , при этом срез происходит по свинцу (исходная  $\sigma_{cp}$  для свинца равна  $1 \text{ кг}/\text{мм}^2$ ).

Анализ микроструктуры этого соединения показывает, что на границе латунь — свинец никаких видимых в микроскоп промежуточных соединений не образуется. Граница неровная, периодичность и размеры волн выражены нечетко.

Отжиг этой пары на установке «Vakuterm» с регистрацией изменения микроструктуры во время отжига не выявил изменений в границе раздела вплоть до полного расплавления свинца.

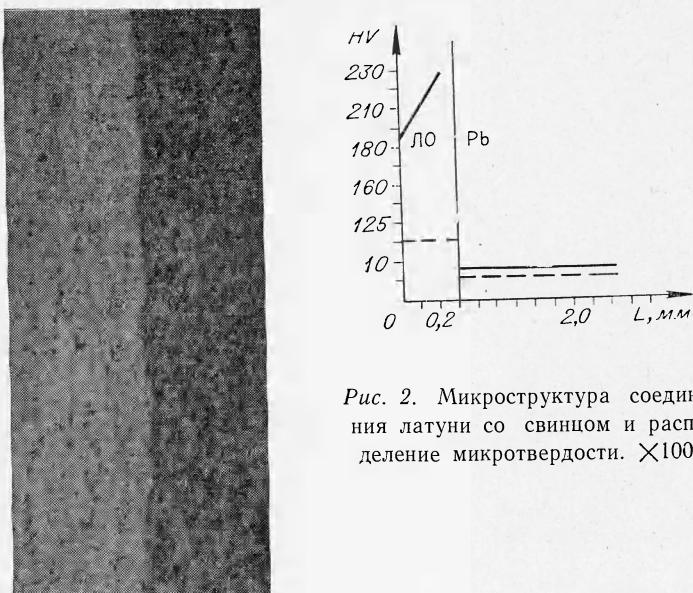


Рис. 2. Микроструктура соединения латуни со свинцом и распределение микротвердости.  $\times 100$ .

На рис. 3 показано соединение свинца марки С1 с алюминием марки АД1 и изменение микротвердости. Установлено, что при сварке взрывом алюминий образует прочные соединения как со свинцом, так и со многими другими металлами. Полученное соединение алюминия со свинцом имеет безволновой характер. Твердость свинца повышается незначительно. Механические испытания биметалла на срез показали, что  $\sigma_{cp} = 1,15 \text{ кг}/\text{мм}^2$ .

Рентгенографический анализ этой пары каких-либо новых соединений на основе Pb — Al не зафиксировал.

Получить качественное соединение свинца со сталью, как и в работе [2], в наших исследованиях не удалось. На рис. 4 представлена рентгенограмма границы свинец — сталь, на которой видно, что кроме линий железа и свинца присутствуют рефлексы с межплоскостными расстояниями 2,77; 1,96; 1,60 Å, относящиеся, по-видимому, к соединению  $\text{Fe}_2\text{PbO}_3$ .

При сварке свинца с ниобием и цирконием качественного соединения получить не удается. Рентгенографический анализ зоны соединения никаких новых фаз не выявил.

Особый практический интерес представляет соединение титана и его сплавов со свинцом. Так, в настоящее время при электролизе цинка используют свинцовые аноды. Ввиду малой прочности свинца возникает необходимость армирования его каким-либо прочным метал-

лом, причем под армированием следует понимать получение трехслойной конструкции, в которой средний слой является конструкционным, т. е. более прочным. При этом армирующий материал может быть сплошной и в этом случае ставится задача о получении триметалла свинец — титан — свинец.

Возможен вариант, когда титан не сплошной, а выполнен в виде сетки, являющейся каркасом. Выбор титана в качестве армирующего

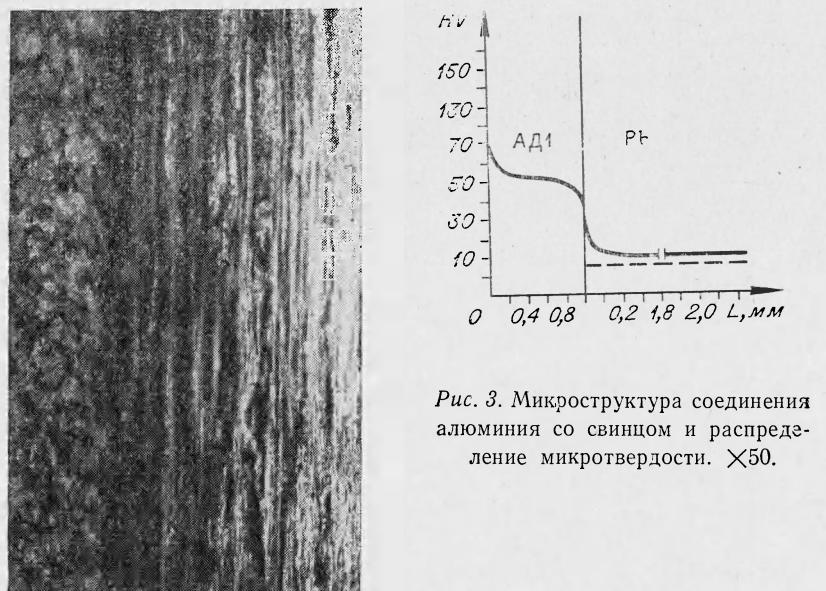


Рис. 3. Микроструктура соединения алюминия со свинцом и распределение микротвердости.  $\times 50$ .

материала продиктован электрохимическими процессами, происходящими при электролизе. Дюралюминий, сталь и медь не могут быть использованы для армирования свинца из-за того, что, участвуя в электролизе, они будут попадать в электролит. Титан же этим недостатком не обладает. Были сварены с титаном несколько свинцовых сплавов с различными прочностными характеристиками, а также чистый свинец марки С1. Различие в прочности у свинцовых сплавов



Рис. 4. Рентгенограмма границы соединения стали со свинцом.

существенно не повлияло на режимы сварки. В половине исследованных случаев происходит соединение без волн. Установлено, что наличие или отсутствие волн не влияет на прочность соединения. Разрушение образцов происходило по свинцу.

На рис. 5 представлена фотография микрошлифа соединения свинец — титан. Была исследована граница для выяснения возможности образования соединений в системе Pb — Ti. Исследования на микроскопе не позволили обнаружить такие соединения. Приведенный нами



Рис. 5. Микроструктура соединения титана со свинцом.  $\times 150$

рентгенографический анализ никаких соединений не обнаружил, хотя по диаграмме состояния Pb — Ti [1] образуются два интерметаллида  $Ti_4Pb$  и  $Ti_2Pb$ .

Для данной пары исследование состава околошовной зоны представляет особый интерес, так как основной характеристикой получаемого анода является его электросопротивление, в связи с этим требуется минимальное сопротивление на границе соединения титана со свинцом. Поэтому, если бы в сварных швах были обнаружены соединения типа интерметаллидов, то они могли бы ухудшить показатель электросопротивления полученного анода. В нашем случае отсутствие интерметаллидов позволяет надеяться на удовлетворительную электропроводность анода.

#### Получение сваркой взрывом армированных свинцовых анодов

Как упоминалось выше, сварка взрывом допускает использование как сплошного армирующего материала, так и материала с определенной формы высечками. На рис. 6 представлены основные формы высечек в армирующем материале, используемые при армировании взрывом. В результате исследований, проведенных по выбору формы высечки, установлено, что для большинства металлов наиболее целесообразны высечки чечевицеобразной формы рис. 6, 3, при условии, что фронт насыщения распространяется вдоль высечки. Всякого рода препятствия на пути фронта насыщения нарушают режим сварки, поэтому, например, для высечки прямоугольной формы выход фронта насыщения на кромку высечки может привести к срыву режима сварки и появлению неприваров. Плавный выход фронта насыщения в случае высечки чечевицеобразной формы обеспечивает устойчивость режима сварки. Для пластичных же материалов, таких как свинец, возможны и высечки круглой формы.

Установлено, что при армировании металлом с высечками толщина армирующего металла не должна превышать толщину арми-



Рис. 6. Основные формы высечки в армирующем материале.

руемого металла. В противном случае армируемый материал будет вырезаться в высечках армирующего материала.

При создании армированного свинцового анода были опробованы оба вида армирующего материала как с высечками, так и без них. Если нет большой необходимости в уменьшении веса армированного материала, технологически более удобно армировать материалом без высечек.

Промышленный анод представляет из себя плоский лист прямоугольной формы. Плакирование титана свинцом осуществлялось по схеме сварки взрывом плоских образцов (см. рис. 1). Таким образом, вначале одна поверхность титана покрывалась свинцом, а затем другая. Были получены трехслойные образцы размером  $100 \times 250 \times 6,5$  мм для изготовления трехслойных анодов и проведения лабораторных испытаний. Проведенные испытания показали возможность использования армированных титаном свинцовых анодов.

### Плакирование алюминиевого сплава АМГ6 свинцом

Проведенные исследования установили невозможность непосредственного плакирования сплава АМГ6 свинцом. Как и в случае сварки, например, стали со свинцом, поверхность пластин из АМГ6 покрывается тонким слоем свинца, а прочное соединение отсутствует. Поэтому была использована способность свинца хорошо свариваться с латунью, медью и алюминием для использования их в качестве промежуточных слоев при получении биметалла АМГ6 — свинец.

**АМГ6 — латунь — свинец.** При сварке АМГ6 со свинцом через латунный промежуточный слой металлографический анализ никаких видимых структурных изменений в АМГ6 не обнаружил, микротвердость соединения возросла до 165 HV. На границе АМГ6 — латунь образуется интерметаллид, имеющий микротвердость порядка 580 HV и обладающий повышенной хрупкостью. Исследования с помощью локального микроанализатора IXA-3A с диаметром электронного пучка 1 мк показали, что это может быть  $\text{CuAl}_2$  или  $\text{Cu}_3\text{Al}_2$ . Существование интерметаллида не оказывается на механических свойствах сварного соединения, так как разрушение образцов происходит по свинцу, обладающему наименьшей прочностью.

**АМГ6 — АД1 — свинец.** В качестве подслоя также был использован алюминий марки АД1. Он обладает хорошей свариваемостью как со свинцом, так и с АМГ6. На границе АМГ6 — АД1 никаких промежуточных соединений не обнаружено. Твердость АМГ6 возросла в среднем со 125 до 140 HV у основания и до 160 HV на контактной поверхности АД1 — АМГ6. Полученные сварные соединения при испытаниях на срез разрушались по свинцу.

### Изготовление изделия из АМГ6, плакированного свинцом

Задача облицовки слоем свинца толщиной 5 мм внутренней поверхности изделия из АМГ6 решалась с использованием опыта сварки плоских образцов из АМГ6 со свинцом. При этом выдвигалось требование получения качественного соединения по всей свариваемой поверхности с поверхностью свинцового слоя. На рис. 7 представлена схема сборки изделия под сварку взрывом.

В качестве подслоя был выбран алюминий марки АД1. Осуществлялось метание одним зарядом слоя АД1 и слоя свинца.

**Выбор схемы плакирования.** В процессе поиска схем сварки была рассмотрена следующая задача. Требуется осуществить метание свинцовой оболочки зарядом ВВ через передаточную среду — воду. В этом случае возникает вопрос о форме заряда и его положении по отношению к свинцовой оболочке. Поскольку зазор между свинцом и АД1 постоянен, то необходимо, чтобы сварка начиналась из нижней точки сферической части изделия.

Для выяснения всех вопросов было осуществлено моделирование метания свинцовой оболочки и наблюдение за всеми процессами с помощью скоростной фотогрегистрирующей установки. В опытах использовались заряды двух типов: с плоским и со сферическим дном. Заряды помещались в колбу с водой с поверхностью, моделирующей поверхность свинцового слоя. Инициирование заряда производилось из нижней его части. Из полученных регистрограмм было установлено, что при заряде со сферическим дном должны быть реализованы условия последовательного насыливания сферической части метаемой оболочки.

**Результаты экспериментов.** По результатам моделирования процесса метания на СФР, плакирование изделия свинцом осуществлялось по схеме, показанной на рис. 8, а. В качестве ВВ использовалась смесь аммонита с амиачной селитрой в отношении 1 : 2. Количество ВВ было определено из соображений, что свинцовая пластина толщиной 5 мм метается через слой воды. Заряд помещался в предварительно гидроизолированную оболочку. Зазоры устанавливались с помощью фиксаторов. В результате эксперимента слой АД1 приварился везде, кроме сферической части, а слой свинца нигде не приварился. Кроме этого, сверху на расстоянии 50—60 мм от края изделия наблюдался отрыв свинца.

По результатам этого эксперимента была изменена форма заря-

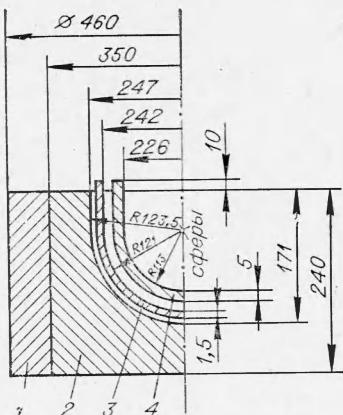


Рис. 7. Схема сборки изделия под сварку взрывом.  
1 — стальная обойма; 2 — изделие;  
3 — слой алюминия; 4 — слой свинца.

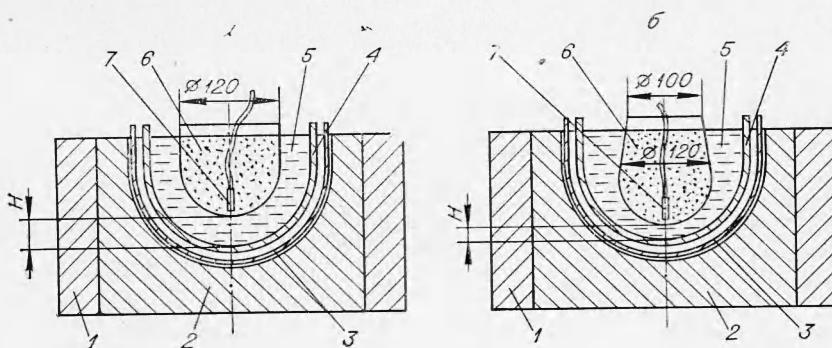


Рис. 8. Схема сварки с использованием передаточной среды.  
1 — стальная обойма; 2 — изделие; 3 — слой алюминия; 4 — слой свинца; 5 — вода;  
6 — заряд ВВ; 7 — детонатор.

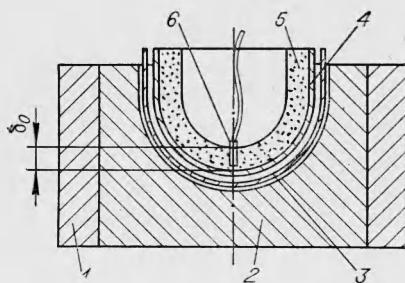


Рис. 9. Схема сварки изделия.  
1 — стальная обойма; 2 — изделие; 3 — слой алюминия; 4 — слой свинца; 5 — заряд ВВ; 6 — детонатор.

тате были получены изделия из АМГ6, плакированные свинцом с качественной сваркой по всем слоям и по всей свариваемой поверхности.

Поступила в редакцию  
23/V 1972

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. Хансен, К. Андерко. Структуры двойных сплавов. Перев. с англ. М., ИЛ, 1962.
2. А. М. Ставер, А. Н. Киселев и др. Докл. III всесоюзн. совещ. по сварке разнородных материалов. Киев, 1967.
3. A. Deribas, F. Matveenkov a. o. Symposium High Dynamic Pressure, Paris, 1967.
4. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, СО АН СССР, «Наука», 1972.

УДК 662.215.2

## УДАРНЫЙ СИНТЕЗ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

И. М. Барский, В. Я. Диковский, А. И. Матыцин  
(Новосибирск)

Двойные системы Nb — Sn, Nb — Ge и Nb — Pb привлекают внимание многих исследователей. Наиболее изучена система Nb — Sn, представляющая большой интерес с точки зрения сверхпроводимости, поскольку в ней существует соединение  $Nb_3Sn$  со структурой типа  $Cr_3Si$  (A15), имеющее высокую температуру перехода в сверхпроводящее состояние [1], высокое критическое магнитное поле [2] и большую критическую плотность тока [3]. В другой, менее изученной системе Nb — Ge также существует аналогичное сверхпроводящее соединение  $Nb_3Ge$  [4]. Равновесное соединение  $Nb_3Ge$  с содержанием Ge около 19 ат. % имеет критическую температуру  $6,9^{\circ}K$  [5], однако быстрой закалкой с высотой температуры удается под-