

УДК 669.245:620.18

**А. Э. Халилов, А. Ф. Гибадуллина, С. В. Беликов**

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург

\**a.y.zhilyakov@urfu.ru*,

Научный руководитель – канд. техн. наук *А. Ю. Жиликов\**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ВТОРЫХ ФАЗ В СПЛАВАХ С4 И ХН65МВУ

Методами растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа исследовано выделение вторых фаз в сплавах С4 и ХН65МВУ. На основе металлографических данных построены участки диаграмм выделения вторых фаз в этих сплавах.

*Ключевые слова:* никель-хром-молибденовые сплавы, выделение вторых фаз, электронная микроскопия, межкристаллитная коррозия, диаграммы «время–температура–выделение».

***A. E. Khalilov, A. F. Gibadullina, S. V. Belikov***

## INVESTIGATION OF SECOND PHASE PRECIPITATION IN C4 AND KH65MVU ALLOYS

Using the methods of scanning electron microscopy and micro-X-ray spectral analysis, the second phase precipitation in C4 and KH65MVU alloys has been studied. On the basis of metallographic data, sections of the diagrams «time-temperature-precipitation» in these alloys were developed.

*Keywords:* nickel-chromium-molybdenum alloys, second phase precipitation, electron microscopy, intergranular corrosion, diagrams «time–temperature–precipitation».

Коррозионностойкие никель-хром-молибденовые сплавы нашли широкое применение в химической промышленности и энергетике. Традиционно их используют в состоянии однофазного ГЦК-твердого раствора на никелевой основе. Соответствующей термической обработкой для его получения является закалка. Полученное состояние является метастабильным и любое температурное воздействие может приводить к структурным изменениям в сплаве. В отсутствие большого количества точечных и линейных дефектов выделение вторых фаз будет происходить по границам зерен, что при взаимодействии с коррозионной средой приводит к развитию опасной межкристаллитной коррозии (МКК). Для того, чтобы минимизировать риск возникновения МКК, необходимо правильно выбирать температуру нагрева под закалку, чтобы она находилась в однофазной области фазовой диаграммы с одной стороны, и

избегать попадания в температурный интервал образования вторых фаз при эксплуатации – с другой. Поэтому, изучение процессов выделения вторых фаз в этих сплавах, построение соответствующих диаграмм: «время-температура-выделение» является актуальной задачей металловедения.

В работе методами растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа исследовано выделение вторых фаз в сплавах С4 и ХН65МВУ.

Химический состав сплава С4: 14,5–17,5 % Cr, 14–17 % Mo, < 3 % Fe, < 0,05 % Si, < 1 % Mn, < 0,009 % C, < 2,0 % Co, < 0,01 % S, < 0,07 % Ti, 60–65 % Ni.

Химический состав сплава ХН65МВУ: 60,3–67,5 % Ni, 14,5–16,5 % Cr, 15–17 % Mo, 3–4,5 % W, < 0,5 % Fe, < 0,1 % Si, < 1 % Mn, < 0,02 % C, < 0,012 % S.

Термическая обработка образцов была проведена по схеме, представленной на рис. 1.

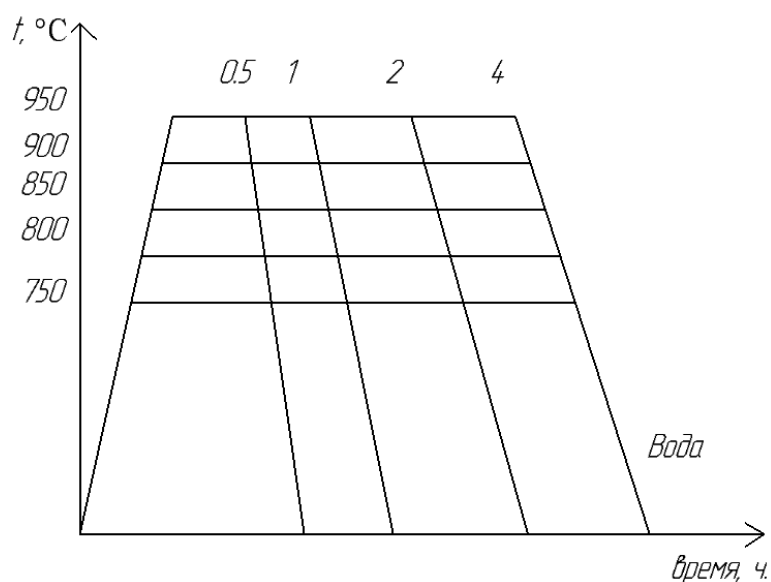


Рис. 1. Схема термической обработки для образцов из сплава С4 и ХН65МВУ

Исходная структура обоих сплавов представляла собой твердый раствор на основе никеля с незначительным содержанием неметаллических включений. После отжигов по различным режимам в обоих сплавах по границам зерен произошло выделение вторых фаз (рис. 2). Химический состав образовавшихся выделений приведен в табл. 1. В сплаве С4 частицы обогащены молибденом, в сплаве ХН65МВУ – молибденом и вольфрамом.

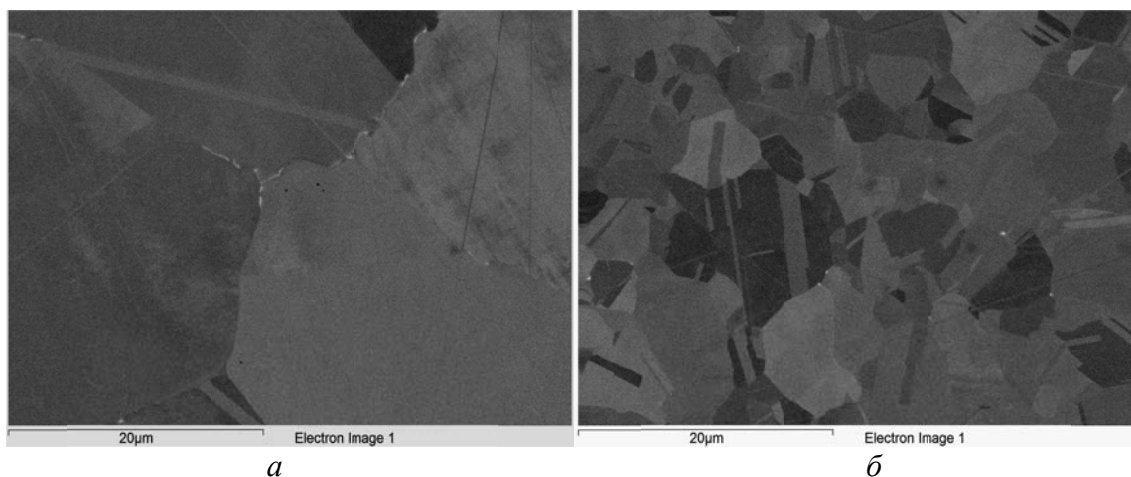


Рис. 2. Структура сплавов при выдержке в течение 4 часов при 750 °С:  
*a* – С4, *б* – ХН65МВУ

Таблица 1

Химический состав фаз, выделевшихся в сплавах

Элемент	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Mo	W
Сплав С4							
950 °С, 4 часа	0.2	0.1	13.6	0.2	35.3	50.6	–
Сплав ХН65МВУ							
900 °С, 2 часа	–	–	14.0	0	39.7	38.0	8.3

На основании металлографического анализа был построен участок С-образной диаграммы выделения избыточных фаз в сплаве С4 и ХН65МВУ (рис. 3). При построении диаграммы были нанесены все экспериментальные точки. Там, где металлографическим методом были зафиксированы выделения вторых фаз экспериментальные точки выделены черным цветом.

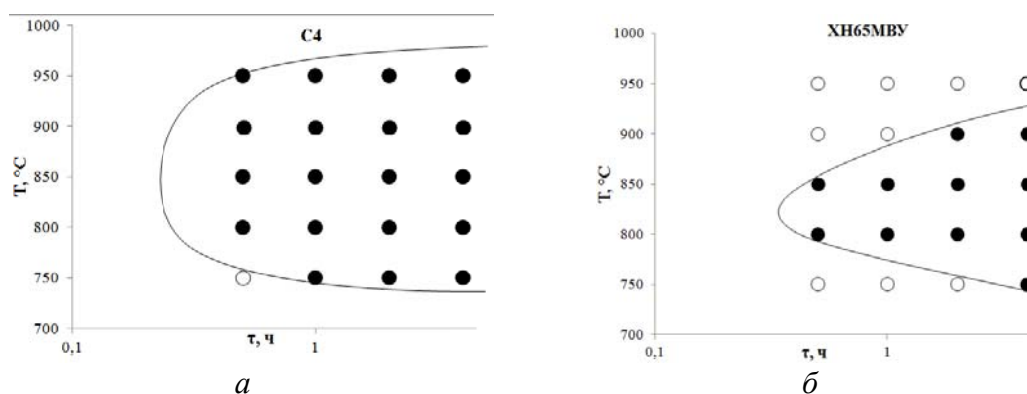


Рис 3. Диаграмма выделения вторых фаз в сплавах: *a* – С4, *б* – ХН65МВУ

Таким образом, металлографическим методом зафиксировано выделение избыточных фаз в сплаве С4 при любых режимах ТО, кроме выдержки 30 минут при температуре 750 °С. Минимальная устойчивость твердого раствора при 800...950 °С составила 0,5 ч. В сплаве ХН65МВУ этим методом минимальная устойчивость зафиксирована в интервале 800...850 °С через полчаса выдержки. Температурный интервал выделения вторых фаз уже, чем для сплава С4 – 750...900 °С.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-1032.2017.8.*