

УДК 539.53; 669.245

СВЯЗЬ МЕЖДУ МИКРОТВЕРДОСТЬЮ СПЛАВОВ NI–CR–MO И ЭНЕРГИЕЙ ВНЕДРЕНИЯ ИНДЕНТОРА В ВЕЩЕСТВО**Никифоров А.Г., Ковалева А.А., Аникина В.И.***Сибирский федеральный университет, Красноярск, e-mail: angeli-kovaleva@yandex.ru*

Исследована зависимость микротвердости HV трехкомпонентных твердых растворов системы Ni–Cr–Mo на основе никеля от состава. Установлена линейная зависимость между микротвердостью образцов и концентрацией примесей в области 0–22 ат. % для хрома и 0–16 ат. % для молибдена. Показано, что использование энергии внедрения индентора в образец позволяет оценить не только прочность кристаллической решетки вещества, но и связать ее с энергией кристаллической решетки. Предложена формула, связывающая микротвердость HV с количеством образующих его компонентов, выраженным в ат. %. Наряду с микротвердостью введена величина, названная нами работой разрушения, позволяющая оценить энергию разрыва межатомных связей при внедрении индентора в сплав. Показано, что на величину микротвердости больше влияет введение хрома и молибдена, чем взаимодействие между этими компонентами.

Ключевые слова: микротвердость, никелевые сплавы, твердые растворы**THE RELATIONSHIP BETWEEN MICROHARDNESS ALLOYS NI–CR–MO AND THE ENERGY OF THE INDENTER INTRODUCING INTO THE SUBSTANCE****Nikiforov A.G., Kovalyova A.A., Anikina V.I.***Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: angeli-kovaleva@yandex.ru*

The dependence of the microhardness HV of ternary solid solutions of Ni–Cr–Mo based on the composition of the nickel is investigated. The formula relating the microhardness HV with the amount of its constituent components, expressed in at. %, is suggested. The linear dependence between microhardness of samples and concentration of impurities is set in the 0–22 at. % Chromium and 0–16 atm. % Molybdenum. It is shown that the using the energy of indenter's implementation into the sample allows us to estimate not only the strength of the crystal lattice of the substance, but also to link it with the energy of the crystal lattice. Along with microhardness introduced the quantity, called the work we do destruction, allowing to estimate the energy gap of the interatomic bonds in the implementation of the indenter into the alloy. Along with microhardness we introduced the quantity, that was called the work of destruction, allowing to estimate the energy of the gap of the interatomic bonds when implementing of the indenter into the alloy. It is shown that introduction of chromium and molybdenum has a greater effect on the value of microhardness, than the interaction between these components.

Keywords: microhardness, nickel alloys, solid solutions

Измерение микротвердости является одним из методов исследования, позволяющим количественно оценить прочность металлических сплавов [1, 2]. В настоящей работе приведены результаты измерения микротвердости трехкомпонентного твердого раствора на основе никеля Ni–Cr–Mo. При этом была найдена зависимость микротвердости от химического состава не только для трехкомпонентного сплава Ni–Cr–Mo, но и для бинарных систем Ni–Cr и Ni–Mo, а также оценивались результаты взаимного влияния двух примесей. В качестве растворителя был выбран никель, который часто является одним из основных компонентов жаропрочных и нержавеющей сталей. Растворимость молибдена в никеле достигает 12 ат. %, а растворимость хрома в никеле более 30 ат. % [3].

Наряду с определением микротвердости, нами была получена величина, названная работой разрушения. Смысл этой величины заключается в следующем: как известно, кристаллическую решетку можно разрушить двумя методами – термически и механически. Зная теплоту сублимации, мы, по сути, имеем энергию, затраченную

на разрушение моля вещества. Определив экспериментально энергию, затраченную на внедрение индентора в образец, и пересчитав её на моль вещества, мы можем выяснить какая доля межатомных связей была разрушена механическим путем.

Материалы и методика эксперимента

Для исследований было выплавлено 77 металлических однофазных сплавов системы Ni–Cr–Mo. Концентрации компонентов были таковы, что все сплавы представляли собой твердые растворы на основе никеля. Плавка металлов производилась электрической дугой в медной водоохлаждаемой изложнице в атмосфере аргона. Перед измерениями образцы шлифовались, полировались и отжигались в вакуумной печи при температуре 800 °C в течение 8 часов. Микротвердость измеряли на микротвердометре ПМТ-3 в 10 точках по стандартной методике [4], относительная погрешность измерений составляла 1–3 %.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты измерений микротвердости приведены в табл. 1.

Полученные результаты показывают, что между микротвердостью образцов и концентрацией примесей наблюдается

линейная зависимость в области 0–22 ат. % для хрома и 0–16 ат. % для молибдена. Учитывая вышесказанное, можно записать уравнение

$$HV = a + b(X_{Cr} + X_{Mo}), \quad (1)$$

где – a и b коэффициенты; X_{Cr} и X_{Mo} – концентрации хрома и молибдена соответственно, выраженные в ат. %.

Коэффициент $a = 0,615$ ГПа – это микротвердость чистого никеля, определенная экспериментально.

Таблица 1

Зависимость микротвердости, ГПа, для Ni–Cr–Mo от состава сплавов

Отношение $X_{Mo}/(X_{Cr} + X_{Mo})$	$X_{Cr} + X_{Mo}$, ат. %						
	4	7	10	13	16	19	22
0	0,8978	1,0035	1,0149	1,402	1,5388	1,857	2,1624
0,1	1,0751	1,1157	1,3477	1,5229	1,7048	2,1575	2,2505
0,2	1,0448	1,2098	1,3052	1,636	1,7826	2,043	2,6332
0,3	1,151	1,3703	1,4199	1,7413	1,897	2,3664	2,7449
0,4	1,1427	1,1862	1,4536	1,8388	2,0402	2,6596	2,8017
0,5	1,1548	1,4549	1,5739	1,9285	2,049	2,5281	2,8978
0,6	1,1872	1,5218	1,7131	2,0104	2,1905	2,5498	3,355
0,7	1,1823	1,5798	1,6334	2,0845	2,2655	3,1913	4,3636
0,8	1,1585	2,116	1,7862	2,1508	2,2604	2,8089	5,3433
0,9	1,2776	1,5331	1,7702	2,2093	2,4162	3,1652	4,6734
1	1,4695	1,4431	2,0535	2,26	2,6987	4,6579	5,222

В свою очередь, обработка результатов показала, что коэффициент b линейно зависит от соотношения $X_{Mo}/(X_{Cr} + X_{Mo})$ следующим образом:

$$b = 0,07035 + 0,5024X_{Mo}/(X_{Cr} + X_{Mo}). \quad (2)$$

В итоге получается соотношение

$$HV = 0,615 + 0,07035X_{Cr} + 0,1206X_{Mo}. \quad (3)$$

Таблица 2

Зависимость микротвердости, ГПа, для Ni–Cr–Mo от состава сплавов, ат. %

Отношение $X_{Mo}/(X_{Cr} + X_{Mo})$	$HV = HV_0 + b(X_{Cr} + X_{Mo})$	Достоверность
0	$HV = 0,615 + 0,068(X_{Cr} + X_{Mo})$	$R^2 = 0,958$
0,1	$HV = 0,615 + 0,073(X_{Cr} + X_{Mo})$	$R^2 = 0,974$
0,2	$HV = 0,615 + 0,082(X_{Cr} + X_{Mo})$	$R^2 = 0,959$
0,3	$HV = 0,615 + 0,085(X_{Cr} + X_{Mo})$	$R^2 = 0,968$
0,4	$HV = 0,615 + 0,1(X_{Cr} + X_{Mo})$	$R^2 = 0,973$
0,5	$HV = 0,615 + 0,096(X_{Cr} + X_{Mo})$	$R^2 = 0,982$
0,6	$HV = 0,615 + 0,096(X_{Cr} + X_{Mo})$	$R^2 = 0,984$
0,7	$HV = 0,615 + 0,101(X_{Cr} + X_{Mo})$	$R^2 = 0,969$
0,8	$HV = 0,615 + 0,102(X_{Cr} + X_{Mo})$	$R^2 = 0,869$
0,9	$HV = 0,615 + 0,122(X_{Cr} + X_{Mo})$	$R^2 = 0,974$
1,0	$HV = 0,615 + 0,123(X_{Cr} + X_{Mo})$	$R^2 = 0,959$
Среднее	$HV = 0,615 + b(X_{Cr} + X_{Mo})$	
	$b = 0,07035 + 0,5024X_{Mo}/(X_{Cr} + X_{Mo})$	$R^2 = 0,911$
Итоговое	$HV = 0,615 + 0,07035X_{Cr} + 0,1206X_{Mo}$	

Полученное соотношение показывает, что на величину микротвердости больше влияет введение хрома и молибдена, чем взаимодействие между этими компонентами.

Наряду с измерением микротвердости мы попытались определить энергию, затраченную на внедрение индентора в сплав. Использование этой величины позволяет оценить не только прочность кристаллической решетки вещества, но и связать ее с энергией кристаллической решетки. Воспользуемся классической формулой по определению работы A :

$$A = \int PdV, \quad (4)$$

где P – давление; V – объем внедрения индентора в сплав.

Свяжем глубину внедрения пирамиды h с диагональю отпечатка d :

$$\frac{d}{2} = h \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2},$$

где θ – угол между гранями пирамиды.

$$A = \int PdV = \int \frac{mg}{S} 2h^2 \left(\operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} \right) \cdot dh = \int_0^h mg \cdot dh = mgh. \quad (10)$$

Свяжем работу внедрения индентора A с микротвердостью HV :

$$A = HV \cdot S \cdot h = 3HV \cdot V_p, \quad (11)$$

где V_p – объем внедрения индентора.

Определим работу, которая придется на один моль вещества:

$$A_M = A \cdot V_M / V_p = 3HV \cdot V_M \quad (12)$$

где V_M – молярный объем сплава.

Получаем:

$$h = \frac{d}{2 \operatorname{tg} \theta / 2}; \quad (5)$$

$$d = 2h \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2};$$

$$S = \frac{d^2}{2} = 2h^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2}, \quad (6)$$

где S – площадь отпечатка.

Объем пирамиды:

$$V = S \cdot h / 3. \quad (7)$$

В нашем случае объем равен:

$$V = \frac{2}{3} h^3 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2}; \quad (8)$$

$$dV = 2h^2 \cdot \left(\operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} \right) \cdot dh. \quad (9)$$

Работа внедрения индентора:

Величину A_M мы назвали работой разрушения. Она показывает, какая энергия затрачивается на разрушение одного моля вещества под воздействием индентора.

По результатам измеренной микротвердости и молярным объемам, взятым из статьи [6], были построены графики зависимости работы разрушения от состава сплавов. Полученные результаты приведены на рис. 1–2.

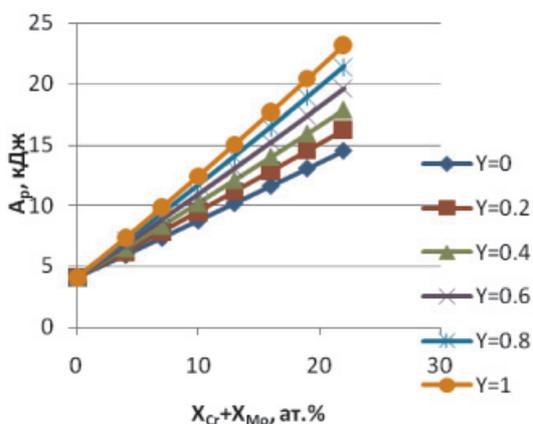


Рис. 1. Зависимость работы разрушения сплавов Ni–Cr–Mo от содержания хрома и молибдена в сплаве

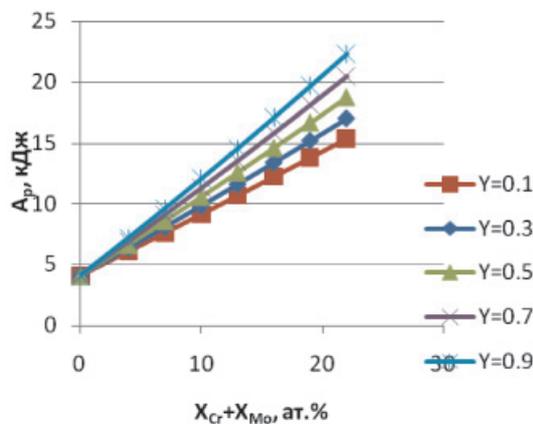


Рис. 2. Зависимость работы разрушения сплавов Ni–Cr–Mo от содержания хрома и молибдена в сплаве

Выводы

В результате проделанной работы были получены зависимости микротвердости от состава сплавов:

$$HV = (0,6148 + 0,07035X_{Cr} + 0,1206X_{Mo}) \text{ ГПа,}$$

где X_{Cr} и X_{Mo} – содержание хрома и молибдена в сплаве, выраженное в ат. %.

Наряду с микротвердостью была определена величина работы разрушения, показывающая какая энергия затрачивается на механическое разрушение одного моля твердого вещества, и выявлена зависимость этой величины от состава сплава.

Список литературы

1. Глазов В.М. Микротвердость металлов и полупроводников / В.М. Глазов, В.Н. Вигдорович. – М.: Металлургия, 1969. – 248 с.
2. Самойлов Ю.В. Поверхностное натяжение расплава и структура никелевых сплавов / Ю.В. Самойлов, Э.И. Цвирко, В.Е. Самойлов, В.В. Кудин // ISSN 1607-6885. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2008. – № 1.
3. Хансен М. Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко. – М.: Металлургия, 1962. – 1487 с.
4. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976, – 230 с.
5. Леонов В.В. Микротвердость тройных твердых растворов Ni-Cu-Nb на основе никеля // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 3. – 2009. – № 2. – С. 334–336.
6. Никифоров А.Г. Определение молярных объемов трехкомпонентных сплавов на основе никеля через моляр-

ные объемы двухкомпонентных сплавов / А.Г. Никифоров, Л.Н. Комарова // Научное пространство Европы: материалы IV научно-практической конференции. – 2008. – Т 28, Физика, Математика. – София: Бял. ГРАД-БГ, 2008.

References

1. Glazov V.M. Mikrotverdost of metals and semiconductors / V.M. Glazov, V.N. Vigdorovich. M.: Metallurgy, 1969. 248 p.
2. Samoylov Yu. V. Superficial tension of fusion and structure of nickel alloys / Yu. V. Samoylov, E.I. Tsvirko, V.E. Samoylov, V.V. Kudin // ISSN 1607-6885. Novі materіali і tenologії in metallurgії that mashinobuduvannі no. 1, 2008.
3. Hansen M. Structures of double alloys / M Hansen, K. Anderko. M.: Metallurgy, 1962. 1487 c.
4. Grigorovich V.K. Tverdost and microhardness of metals. M.: Science, 1976, 230 p.
5. Leonov V.V. Mikrotverdost of threefold firm solutions Ni-Cu-Nb on the basis of nickel. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 3 (2009 2), pp. 334–336.
6. Nikiforov A.G. Determination of molar volumes of three-component alloys on the basis of nickel through molar volumes of two-component alloys / A.G. Nikiforov, L.N. Komarova // Materials IV scientific the practical confrence «Scientific Space of Europe», 2008, T 28, Physics, Mathematics. Sofia. Byal. GRAD-BG 2008.

Рецензенты:

Прошкин А.В., д.т.н., профессор, начальник ЛУФМ департамента новых технологий ООО «РУСАЛ ИТЦ», г. Красноярск;

Миронов П.В., д.х.н., профессор, декан факультета переработки природных соединений, Сибирский государственный технологический университет, г. Красноярск.

Работа поступила в редакцию 05.08.2014.