



1. Григоренко Г. М., Помарин Ю. М., Орловский В. Ю. Абсорбция азота железованадиевыми расплавами и жидким ванадием // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1992. — № 2. — С. 92–96.
2. Абсорбция азота жидким ниобием / И. И. Стагкевич, М. М. Нероденко, Г. М. Григоренко и др. // Изв. АН СССР. Металлы. — 1991. — № 4. — С. 175–178.
3. Григоренко Г. М., Помарин Ю. М., Орловский В. Ю. Кинетика взаимодействия азота с жидкими цирконием и титаном // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2001. — № 2. — С. 32–37.
4. Лакомский В. И. Взаимодействие диатомных газов с жидкими металлами при высоких температурах. — Киев: Наук. думка, 1992. — 232 с.
5. Пелке Р. Д., Эллиот Д. Ф. Растворимость азота в жидких расплавах на основе железа // Проблемы современной металлургии. — 1960. — № 6. — С. 3–14.
6. Морозов А. Н. Водород и азот в стали. — М.: Металлургиздат, 1968. — 283 с.
7. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. — Л.: Химия, 1971. — 704 с.
8. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. — Л.: Наука, 1975. — 592 с.
9. Гирифельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. — 929 с.
10. Гиббс Дж. В. Термодинамические работы. — М., Л.: ГИТТЛ, 1950. — 492 с.
11. Арсентьев П. П., Колецов Л. А. Металлические расплавы и их свойства. — М.: Металлургия, 1976. — 376 с.
12. Кушин Л. Л. Поверхностные явления в металлах. — М.: Металлургиздат, 1955. — 304 с.
13. Баум Б. А. Металлические жидкости. — М.: Наука, 1979. — 120 с.
14. Минаев Ю. А. Поверхностные явления в металлургических процессах. — М.: Металлургия, 1984. — 152 с.
15. Кинетические особенности растворения азота в высокорективных металлах / В. В. Лакомский, Ю. М. Помарин, В. Ю. Орловский и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — № 1–2. — 1994. — С. 75–81.
16. Pehlke R. D., Elliot J. F. Solubility of nitrogen in liquid iron alloys. II Kinetics // Trans. Met. Soc. AIME. — 1963. — 227, N 4. — P. 844–855.
17. Лакомский В. И. Плазменно-дуговой переплав. — Киев.: Техника, 1974. — 336 с.
18. Григоренко Г. М., Помарин Ю. М. Водород и азот в металлах при плазменной плавке. — Киев.: Наук. думка, 1989. — 198 с.
19. Рамм В. М. Абсорбция газов. — М.: Химия, 1976. — 654 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 29.10.2003

УДК 669.187.2.002.2

## ВЛИЯНИЕ МЕДИ НА СВОЙСТВА ВЫСОКОЧИСТОГО ХРОМА И ЕГО СПЛАВОВ С ЛАНТАНОМ

А. П. Рудой, Л. П. Жученко, В. Х. Мельник, А. П. Портнов

Индукционным и дуговым способами в печах с медными тиглями и кристаллизаторами выплавлены слитки высокочистого хрома, а также на его основе сплавы с медью и лантаном. Исследованы твердость и температура хрупкого перехода этих сплавов. Показано, что твердость сплавов хрома при содержании 0,15 % мас Cu снижается до 115 МПа, а температура хрупкого перехода — до нуля. В сплавах хрома с 0,25 % мас Cu и добавкой лантана твердость снижается до 100 МПа, а температура хрупкого перехода при 0,15 % мас Cu снижается до  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Ingots of high-purity chromium and alloys on its base, containing copper and lanthanum were melted by induction and arc methods in furnaces with copper crucibles and moulds. Hardness and transition temperature of these alloys were investigated. It is shown that the hardness of chromium alloys at 0,15 mass % Cu content is reduced to 115 MPa, and the transition temperature is decreased to zero. In chromium alloys with 0,25 mass % Cu and addition of lanthanum the hardness is reduced to 100 MPa, and the transition temperature at 0,15 mass % Cu is decreased to  $-20^{\circ}\text{C}$ .

**Ключевые слова:** хром; медь; лантан; сплав; твердость; температура хрупкого перехода

После Второй мировой войны возникла необходимость использования компактного хрома в виде слитков, прутков, труб, ленты для нужд новой техники. По оценке ряда иностранных фирм чистота такого хрома должна была быть не менее 99 %. В ряде работ, которые проводились также сотрудниками НАН Украины, было установлено, что хром очень чувствителен к наличию примесей, образующих твердые растворы внедрения (азот, кислород, углерод, водород и др.), содержание которых более  $10^{-4}$  % мас приводит к существенному его охрупчиванию вследствие образования пересыщенных твердых растворов и двухфазных сплавов [1].

Во Всесоюзном институте легких сплавов (г. Москва) выплавлялись слитки «чистого» хрома ВХ-1 с содержанием железа, никеля, меди 0,3 %, углерода 0,05 %, кислорода 0,09 %, азота 0,04 %, а в сумме — 0,48 % контролируемых примесей [2].

Известно, что особо чистый кристаллический хром иодидного рафинирования характеризуется удовлетворительной пластичностью и в некоторых случаях может использоваться в качестве защитных покрытий в окислительных средах и продуктах сгорания топлива. Однако процесс иодидного рафинирования хрома малопроизводительный и дорогостоящий, что значительно ограничивает его использование в защитных покрытиях.

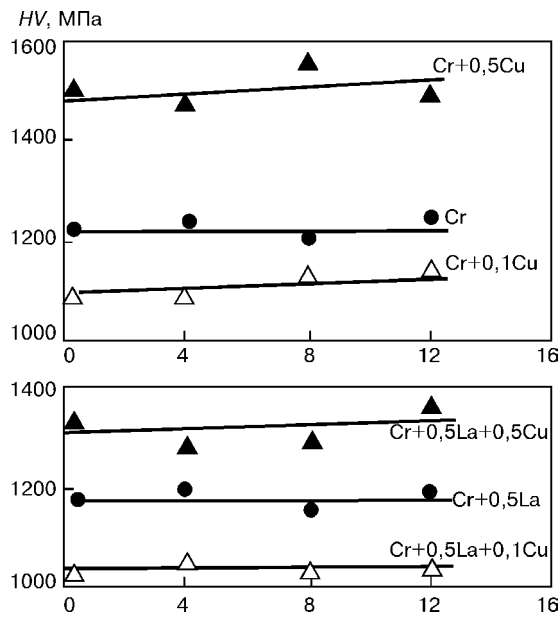


Рис. 1. Изменение твердости по сечению слитков

Поскольку в послевоенные годы для применения в технике требовался компактный хром в слитках чистотой не ниже 99,9 %, нами были начаты работы по созданию плавильного оборудования, на котором можно было бы выплавлять слитки хрома указанной чистоты. Первоначально в Институте металлофизики АН УССР (ИМФ) были созданы индукционные печи с холодными тиглями, позволяющие выплавлять слитки высокочистого хрома диаметром до 40... 45 мм. Эти печи питались от высокочастотных (60... 70 кГц) ламповых генераторов, обеспечивающих мощность на индукторе до 100 кВ·А при установленной мощности на трансформаторах до 170 кВ·А.

В ИМФ была построена и в 1970 г. запущена в эксплуатацию уникальная индукционно-дуговая печь ИДП-70, в которой выплавлялись слитки хрома и его сплавов диаметром 70... 80 мм и массой 8... 10 кг [3]. Для получения таких слитков использовался хром марки ЭРХ. Печь включала две камеры дегазации шихты, а также установки для очистки инертных газов, что обеспечивало чистоту слитков 99,95 %. С помощью дозаторов шихты в печи ИДП-70 можно было на основе высокочистого хрома получать сплавы, содержащие редкоземельные металлы, а также никель, железо, ванадий, титан, марганец, галлий и другие легирующие компоненты. В этой печи выплавлялось до 1 т слитков в год.

Кроме этого, в Институте металлофизики были смонтированы и опробованы в работе еще несколько печей большой мощности. Например, индукционные печи, работающие от одного или двух машинных вертикальных преобразователей частоты на 10 кГц и мощностью 250 кВ·А каждый, а также дуговая печь постоянного тока, имеющая автономную подстанцию на 1200 кВ·А с полупроводниковым выпрямителем до 10000 А. Плавильные печи и вспомогательное оборудование размещены в технологическом корпусе ИМФ на площади 1440 м<sup>2</sup>. В 1990 г.

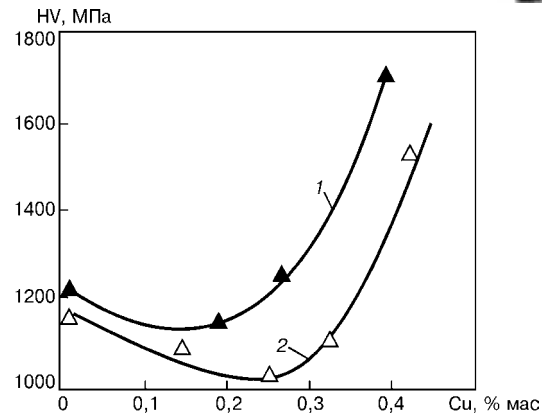


Рис. 2. Влияние меди на твердость хрома (1) и его сплава с 0,5 % мас лантана (2)

этот плавильный участок считался лучшим в Советском Союзе по качеству производимых слитков тугоплавких металлов.

В течение 25 лет (1969–1994 гг.) в отделе технологии сплавов Института металлофизики, которому принадлежало это оборудование, изучали качество слитков и влияние легирующих компонентов на свойства сплавов на основе высокочистого хрома. В 1991 г. в этом институте проводились исследования влияния меди на свойства хрома и его сплавов. Согласно диаграмме состояния, медь в хrome не растворяется и не образует интерметаллидных фаз. Однако поскольку слитки хрома выплавлялись в основном в медных изложницах и кристаллизаторах, возникла необходимость проверки влияния небольших количеств меди на свойства хрома и его сплавов с лантаном, которые наиболее полно изучены в работах [1, 3–6].

В таблице приведено содержание элементов в исследованных сплавах хрома, полученное методами рентгеноспектрального (медь, лантан) и химического (азот, кислород) анализов.

Для обеспечения равномерного распределения по объему слитков медь вводили в шихту в виде лигатуры Cr – 10 % Cu. Качество выплавленных слитков контролировали путем измерения твердости HV по их сечению перпендикулярно оси слитков. Из рис. 1 видно, что твердость слитков от центра к периферии изменяется в пределах ошибки экспери-

№ слитка	Состав шихты, % мас	Содержание в слитке, % мас			
		Cu	La	[N]	[O]
1	Cr	0,01	–	0,0051	0,0057
2	Cr+0,1 Cu	0,18	–	0,0056	0,0076
3	Cr+0,2 Cu	0,25	–	0,0074	0,0066
4	Cr+0,3 Cu	0,26	–	0,0013	0,0059
5	Cr+0,5 Cu	0,39	–	0,0062	0,0052
6	Cr+0,5 La	0,07	0,34	0,0074	0,0076
7	Cr+0,1 Cu +0,5 La	0,14	0,24	0,0064	0,0039
8	Cr+0,2 Cu +0,5 La	0,25	0,38	0,0085	0,0020
9	Cr+0,3 Cu + 0,5 La	0,32	0,24	0,0062	0,0034
10	Cr+0,5 Cu+0,5 La	0,43	0,25	0,0063	0,0017

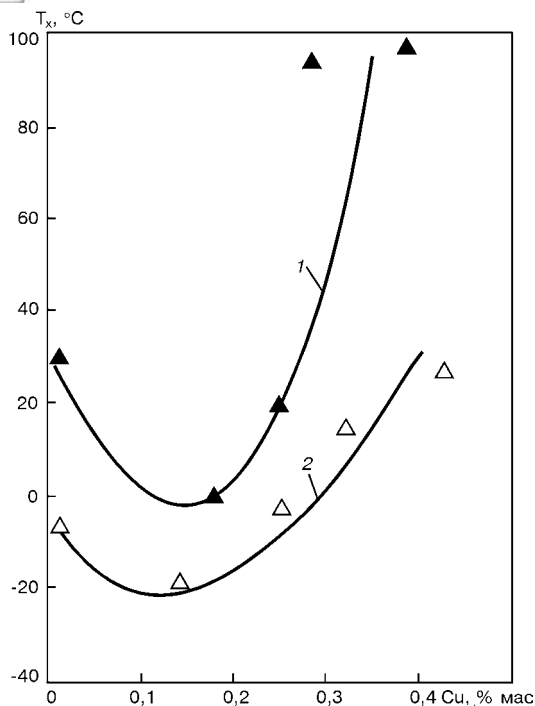


Рис. 3. Влияние меди на температуру хрупкого перехода хрома (1) и его сплава с 0,5 % мас лантана (2)

мента, что свидетельствует об однородности их структуры. Незначительное повышение твердости у периферии слитка наблюдается при содержании меди в чистом хроме до 0,5 % мас.

На рис. 2 приведены зависимости влияния меди на твердость высококчистого хрома и его сплава с лантаном. Как видно, при увеличении содержания меди в хроме до 0,2 % мас твердость сплава снижается, а при дальнейшем повышении ее содержания значительно возрастает. Снижение твердости тройного сплава Cr-La-Cu происходит при повышении содержания меди до 0,25 % мас. Кроме того, сплав тройной системы при таком содержании меди оказывается заметно пластичнее сплава двойной системы (разница в твердости составляет около 250 МПа).

На рис. 3 показаны зависимости температуры перехода из хрупкого состояния ( $T_x$ ) в пластичное от содержания меди в высококчистом хроме и его сплаве с лантаном. В этом случае увеличение содержания меди в меньшей мере влияет на повышение  $T_x$  тройного сплава по сравнению со сплавом Cr-Cu. Для сплава Cr-Cu минимальные твердость и температура хрупкого перехода отмечаются при содержании меди ~ 0,20 % мас.

Слитки (таблица), выплавленные в индукционных печах с холодным тиглем, имеют разные свойства в зависимости от содержания меди и лантана. В высококчистом слитке № 1, куда медь намеренно не вводилась, рентгеноспектральный анализ показал ее содержание 0,01 % мас. В следующие четыре слитка (№ 2–5) медь вводилась с шихтой в количествах 0,1; 0,2; 0,3 и 0,5 % мас. В шестой слиток

вводили только 0,5 % мас La, но и здесь по данным рентгеноспектрального анализа содержание меди составило 0,07 %, т. е. первый и шестой слитки оказались «легированными» материалом медных холодных тиглей печи. В остальные четыре слитка (№ 7–10) медь также вводили в количествах 0,1; 0,2; 0,3 и 0,5 % мас. Кроме этого, в каждый из четырех слитков добавляли по 0,5 % мас La, который улучшает пластичность хрома и его сплавов, однако содержание лантана в этих слитках значительно отличается от исходного в шихте. Это, очевидно, можно объяснить взаимодействием лантана с азотом и кислородом, соединения которых мало растворяются в жидком хроме и могут вытесняться на поверхность слитка. Например, в слитке № 8 содержится 0,38 % мас La, 0,0085 % мас N и 0,0020 % мас O, а в сплаве № 10 содержание этих элементов снизилось: лантана до 0,25 % мас, азота до 0,0063 % мас и кислорода до 0,0017 % мас. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что медь при ее содержании до 0,2 % мас улучшает пластичность высококчистого хрома и его сплавов с лантаном. Увеличение содержания меди выше 0,25 % мас приводит к существенному возрастанию твердости и температуры хрупкого перехода исследованных сплавов, особенно высококчистого хрома с медью (рис. 2 и 3). Из полученных экспериментальных данных следует, что выплавка хрома в индукционных печах с холодным тиглем без добавок в шихту меди, в наших условиях повышает пластичность высококчистого хрома и его сплавов с лантаном за счет перехода меди из «холодных» тиглей в слитки.

Таким образом, при наличии меди в высококчистом хроме и его сплавах с лантаном в количестве 0,2... 0,25 % мас повышается их пластичность. Эти результаты нами получены впервые и могут быть полезными в случае применения таких сплавов в качестве покрытий для защиты деталей и изделий от окисления, а также при контакте с жидким топливом и пороховыми газами.

1. Трефилов В. И., Фирстов С. А., Мильман Ю. В. Физические основы прочности тугоплавких металлов. — Киев: Наук. думка, 1975. — 27 с.
2. Технологическая рекомендация на освоение (Тр. Осв 417-21–82). — Москва: Всесоюзный институт легких сплавов, 1982. — Вып. 1. — 2 с.
3. Рудой А. П., Фиалковский Р. В. Индукционно-дуговой способ плавки металлов // Металлофизика. — 1976. — Вып. 40. — С. 104–106.
4. Влияние редкоземельных металлов на механические свойства хрома / В. Г. Горбач, А. Н. Ракицкий, А. П. Рудой, В. И. Трефилов // Проблемы прочности. — 1972. — № 2. — С. 78–83.
5. Ракицкий А. Н., Рудой А. П. Влияние редкоземельных металлов на температуру хрупкого перехода хрома // Металлофизика. — 1971. — Вып. 36. — С. 59–60.
6. Рудой А. П., Мельник В. Х., Портнов А. П. Свойства сплавов на основе высококчистого хрома // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — № 4. — С. 46–47.

Ин-т металлофизики НАН Украины, Киев

Поступила 29.10.2003