

УДК 669-179

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ХРОМА НА ПРОЦЕСС СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЖИДКИХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

**Тягунов А.Г.<sup>1</sup>**, к.т.н., заведующий кафедрой полиграфии и веб-дизайна (adi8@yandex.ru)

**Вьюхин В.В.<sup>1</sup>**, старший научный сотрудник исследовательского центра физики

металлических жидкостей Института материаловедения и металлургии (v.v.vyukhin@urfu.ru)

**Тягунов Г.В.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор кафедры безопасности

жизнедеятельности (g.v.tyagunov@urfu.ru)

**Барышев Е.Е.<sup>1</sup>**, д.т.н., заведующий кафедрой безопасности

жизнедеятельности (e.e.baryshev@urfu.ru)

**Акиенцев Ю.Н.<sup>2</sup>**, к.т.н., старший научный сотрудник (ayn@imp.uran.ru)

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

<sup>2</sup> Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН

(620990, Россия, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18)

**Аннотация.** Изучены температурные и концентрационные зависимости удельного электросопротивления сплавов системы никель–хром в жидком состоянии. Экспериментальные данные свидетельствуют о нелинейной концентрационной зависимости изотермы электросопротивления изученных сплавов. Результаты исследований температурных и концентрационных зависимостей удельного электросопротивления сплавов никеля и хрома позволяют определить оптимальные условия формирования микрооднородной и равновесной структуры расплава. Использование теории перколяции и квазихимического варианта модели микрооднородного строения жидких металлических сплавов дает возможность качественно объяснить характер изотермы электросопротивления хромоникелевых расплавов. Процесс структурообразования хромоникелевых расплавов по мере роста концентрации хрома представлен в виде схемы, отражающей поэтапное формирование различных кластеров, которые отличаются структурой и размерами.

**Ключевые слова:** температура, концентрация, жидкий металл, система никель–хром, временная зависимость удельного электросопротивления, изотерма, структура, физическая модель.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-565-570

Сплавы на основе никеля обладают хорошей технологичностью, высокой стойкостью против радиационного распухания, жаропрочностью и коррозионной стойкостью в различных средах. Все это позволяет рассматривать их в качестве перспективных конструкционных материалов для машиностроения, авиации и космонавтики; для применения в активной зоне реакторов на быстрых нейтронах, первой стенки и blankets термоядерных реакторов, использующих в качестве теплоносителя расплавы щелочных металлов и их солей [1 – 3].

Главным и обязательным легирующим элементом в никелевых сплавах является хром, который обеспечивает высокое сопротивление окислению.

Диаграмма состояния системы Ni–Cr относится к эвтектическому типу с температурой эвтектического равновесия 1345 °С (рис. 1). Атомные радиусы этих элементов близки и составляют 0,127 и 0,124 нм соответственно, но из-за неизоморфности их решеток (Cr – ОЦК, Ni – ГЦК) они образуют ограниченные твердые растворы:  $\gamma$ -твердый раствор на основе никеля и  $\alpha$ -твердый раствор на основе хрома. При охлаждении  $\gamma$ -твердого раствора до температуры 580 °С может

образовываться упорядоченная фаза Ni<sub>2</sub>Cr, имеющая ромбическую структуру [1, 2, 4].

В качестве конструкционных материалов обычно используют сплавы, содержащие до 28 – 30 % Cr (по массе), в которых при всех температурах фиксируется  $\gamma$ -твердый раствор, т.е. в пределах растворимости хрома в никеле при комнатной температуре. Однако различия в электроотрицательностях никеля и хрома, образование химического соединения Ni<sub>2</sub>Cr, наличие отрицательных отклонений термодинамических свойств сплавов от идеальности при концентрации никеля менее 30 %, максимальная жаропрочность никелевых сплавов при содержании 30 – 35 % Cr (по массе), возрастание энергии связи и сил связи при добавлении хрома к никелю, определяемые по характеристической температуре Дебая, теплоте смешения и изменению свободной энергии, свидетельствуют о более интенсивном взаимодействии между разноименными атомами в системе Ni–Cr по сравнению с одноименными.

Своеобразная роль никеля проявляется при образовании сплавов и интерметаллидов. Переменная валентность, непрерывное и плавно возрастающее искажение

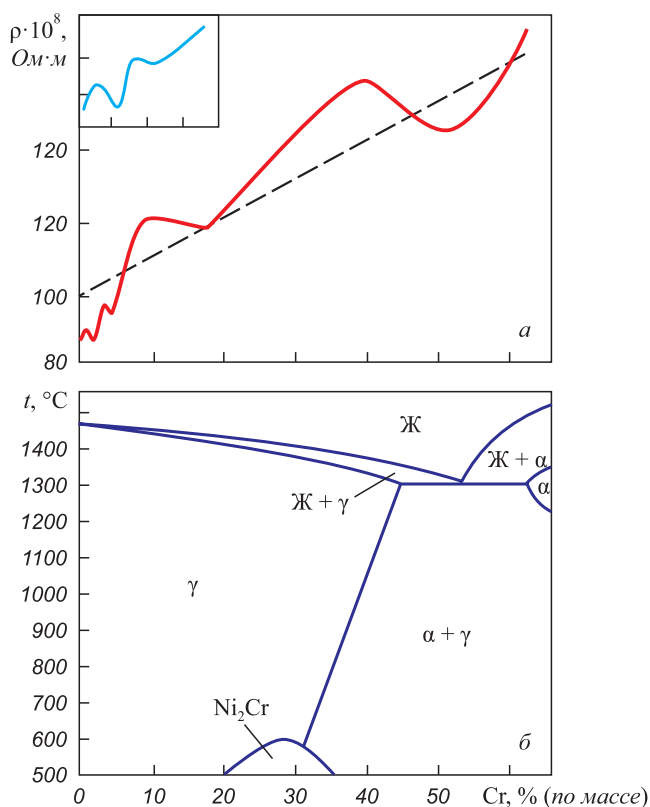


Рис. 1. Диаграмма состояния системы Ni–Cr (а) и изотерма удельного электросопротивления сплавов при  $1700^\circ\text{C}$  (б)

Fig. 1. State diagram of Ni–Cr system (a) and isotherm of specific electrical resistance of alloys at the temperature of  $1700^\circ\text{C}$  (b)

кристаллической решетки твердого раствора на основе никеля по мере увеличения концентрации хрома дают основание для предположения дополнительных полярных связей. При этом определяющим фактором стабильности структуры является электронная концентрация, а не различия размеров атомов [1, 5, 6].

Изменения структуры никеля, нагретого выше температуры Дебая, а также структуры жидкого никеля и его сплавов с хромом обнаружены Д.Б. Шульгиным [7] при изучении политерм магнитной восприимчивости ( $\chi$ ). Наблюдаемые аномальные отклонения  $\chi(t)$  от известной зависимости, соответствующей уравнению Кюри-Вейса, по мнению авторов, связаны с возможностью реализации необходимых условий перколяционного перехода по атомам, кинетическая энергия которых превышает энергию активации перехода ( $E_A$ ) к статической упаковке.

Такой вывод не противоречит распределению Максвелла, согласно которому при температурах, значительно превышающих точку интервала плавления, существует конечное число атомов, энергия которых близка к  $E_A$ . Причем с ростом температуры количество таких атомов и, следовательно, доля занимаемого ими объема увеличивается.

Согласно квазихимическому варианту микронеоднородного строения жидкого металла [8] атом второ-

го элемента вызывает возмущение матрицы вещества, которое распространяется в пределах сферы радиусом до нескольких десятков ангстрем. В частности, радиус возмущенной области вокруг кислорода, внедренного в матрицу никеля, составляет около  $10 \text{ \AA}$ , а внедренного в матрицу железа – около  $20 \text{ \AA}$ . Известны и другие данные.

По образованным вокруг внедренных атомов микрогруппировкам, не имеющим четких границ, но характеризующихся более слабыми силами межатомного взаимодействия в пограничных слоях, чем вблизи примесных атомов, при определенных концентрациях последнего возможен перколяционный переход [8].

Для дальнейшего понимания структурообразования расплава необходимо учесть следующее: процессы взаимного растворения жидких металлов и установление равновесия являются многостадийными. На первом этапе преимущественно за счет конвективной диффузии формируется макроскопически однородное состояние расплава. Далее процессы лимитируются диффузией атомов в микрообласти кластеризованного расплава. Этой стадии свойственен кинетический режим, который может быть ускорен нагревом до критической температуры, зависящей от состава сплава, структуры шихтовых материалов, способа выплавки и других факторов.

Другим вариантом перевода расплава в состояние равновесия является достаточно длительная временная выдержка. После расплавления и нагрева образца до заданной температуры изменение его физических свойств при изотермической выдержке представляет собой типичный вид затухающих колебаний (рис. 2). Длительность выдержки ( $\tau_p$ ), при которой осуществляется переход к колебаниям с амплитудой, не превышающей уровень экспериментальной погрешности, соответствует окончанию периода релаксации структуры расплава в данных условиях [8 – 11]. Незавершенность структурной релаксации приводит к тому, что в жидких сплавах одинакового состава параметры ближнего порядка, характер межчастичных взаимодействий и распределение элементов по структурным составляющим существенно различаются. Такое состояние расплава оказывает влияние на процессы, протекающие при кристаллизации и, как следствие, на структуру и свойства твердого металла.

Наиболее выражено и информативно структурные изменения в расплаве проявляются на температурных зависимостях физических свойств: кинематической вязкости, удельного электросопротивления, магнитной восприимчивости, поверхностного натяжения и плотности.

Известно, что отличительной особенностью металлов является наличие в них почти свободных электронов. Это определяет их уникальные электрические характеристики, специфику межчастичного взаимодействия и, следовательно, все макроскопические

свойства. Поэтому изучение зависимости удельного электросопротивления от состава сплава, температуры и продолжительности экспозиции при неизменных температурах позволяет установить наиболее существенные особенности процесса формирования структуры расплава.

В настоящей работе проведены исследования 36 композиций хромоникелевых сплавов в интервале (0 – 65) % Cr (по массе) в никеле. Время релаксации структуры не превышало 12 мин, кроме составов с содержанием хрома, близком к 30 %, для которых  $\tau_p = 20$  мин. Характерный вид температурной зависимости удельного электросопротивления ( $\rho$ ) хромоникелевых сплавов приведен на рис. 2. В температурном интервале солидус–ликвидус величина  $\rho$  скачкообразно изменяется на 3 – 4 %. Дальнейший нагрев сопровождается повышением удельного электросопротивления, связанным не только с возрастающим фоновым рассеянием электронов проводимости, но и формированием более упорядоченной структуры расплава. Нагрев выше  $t_r$  ( $t_r$  – температура гистерезиса политерм) способствует уменьшению размеров образованных микрогруппировок за счет сокращения приграничной зоны, атомы которой оказались менее связанными энергетически с центрами кластеров и обладали повышенной амплитудой колебаний. Устойчивость образованной структуры сохраняется при охлаждении расплава после его нагрева до критической температуры ( $t_k$ ) вплоть до аномальной температуры ( $t_{ан}$ ). Резкое уменьшение значений  $\rho$  при температуре ниже  $t_{ан}$ , по-видимому, связано с объединением близких по своему строению кластеров в структурные образования или блоки, которые при дальнейшем охлаждении становятся центрами

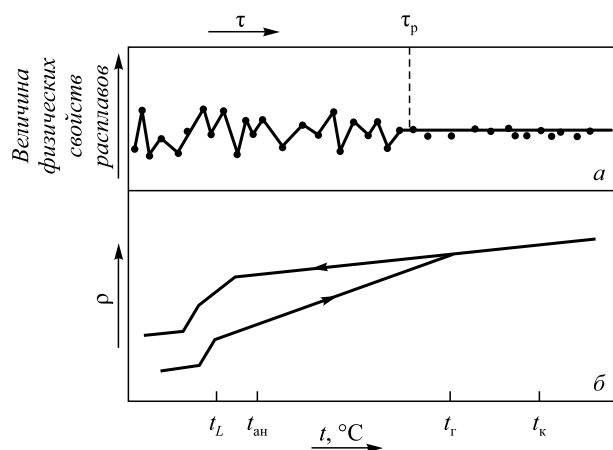


Рис. 2. Типичные зависимости физических свойств жидких хромоникелевых расплавов от продолжительности изотермической выдержки (а) и удельного электросопротивления ( $\rho$ ) жидких хромоникелевых сплавов при нагреве и охлаждении (б)

Fig. 2. Typical dependences of physical properties of liquid chrome-nickel melts on the duration of isothermal exposure (a) and specific electrical resistance ( $\rho$ ) of liquid chrome-nickel alloys at the heating and cooling (b)

кристаллизации. Сокращение межкластерных границ приводит к освобождению части электронов связи, это способствует уменьшению  $\rho$ .

Аналогичный характер политерм физических свойств расплавов обнаружен при исследованиях синтезированных в лабораториях различных металлических композиций, а так же промышленных сталей и сплавов. Резкая перестройка структуры расплава приводит к несовпадению значений свойств, полученных в ходе нагрева образца до критической температуры и последующем охлаждении. Вторичный цикл измерений (нагрев–охлаждение) характеризуется совпадением результатов с обратной ветвью первоначальной зависимости, т.е. можно уверенно констатировать, что политермы свойств служат критерием для оценки степени удаленности расплава от равновесного состояния.

Концентрационная зависимость удельного электросопротивления хромоникелевых сплавов, находящихся в равновесном состоянии, представлена на рис. 1. Волнообразный характер изотермы  $\rho$  наблюдается не только при малых добавках хрома, но и при больших его концентрациях.

Результаты корреляционного анализа, выполненного с применением пакета Advanced Grapher, представлены на рис. 1 (показаны пунктирной линии, отражающей зависимость удельного электросопротивления хромоникелевых расплавов от концентрации хрома).

Действительно, при близких значениях атомных радиусов хрома и никеля фактор фонового рассеяния электронов проводимости практически мало зависит от состава сплавов. Следовательно, в некотором приближении можно сделать вывод о преобладающем влиянии на величину  $\rho$  количества свободных электронов  $n$ , приходящихся на один атом. Поскольку хром характеризуется меньшим значением  $n$ , то вполне естественно, что сплавы с большим содержанием хрома обладают повышенным электросопротивлением. Однако экспериментальные данные свидетельствуют о нелинейности изотермы  $\rho$  изученных сплавов.

При введении атомов хрома в никель происходит значительное искажение структур электронной и атомной подсистем никеля в некоторой области вблизи примесного атома. В результате образуется микрогруппировка, характер упорядочения в которой отличается от такового в микрообластях никеля, не подверженных возмущающему действию атомов хрома.

Вследствие разной электроотрицательности атомов никеля система приобретает избыточный заряд. Возмущенный потенциал этого заряда имеет конечный радиус действия и охватывает несколько координационных сфер вокруг каждого атома хрома. В результате электронного взаимодействия между атомами хрома и никеля образуются локальные блоки упорядочения, которые являются дополнительным фактором рассеяния электронов проводимости [12 – 14]. Появление кластеров в системе Ni–Cr приводит к повышению ее элект-

росопротивления, причем тем сильнее, чем больше кластеров, т.е. чем выше концентрация хрома в сплаве. В результате электронного взаимодействия между атомами хрома и никеля образуются локальные блоки упорядочения, являющиеся дополнительным фактором рассеяния электронов проводимости. Повышение количества кластеров в системе приводит к повышению ее электросопротивления, причем тем сильнее, чем больше кластеров, т.е. чем выше концентрация хрома в сплаве.

Используя положение теории перколяции, удается представить процессы возникновения кластеров, образование их цепи, а затем появление зон перекрытий (рис. 3).

При выплавке сплавов энергия теплового движения атомов  $k_T$  не превышает энергетических барьеров. Это способствует сохранению в структуре расплавов нескольких видов микрогруппировок, различающихся по составу и размерам. При критических температурах происходит повышение потенциального барьера, удерживающего их. Прежде всего это касается поверхностных границ кластеров больших размеров.

Наблюдаемые на рис. 1 максимумы на изотерме соответствуют концентрациям, при которых структура сплавов системы Ni–Cr обладает наибольшим рассеянием электронов проводимости. После каждого максимума последующее повышение концентрации хрома приводит к появлению каналов проводимости, к снижению удельного электросопротивления и формированию концентрационных областей минимальных значений  $\rho$ , соотношение между центрами которых равно 3 – 4.

Процесс структурообразования хромоникелевых расплавов по мере роста концентрации хрома представлен в виде схемы (рис. 3), отражающей поэтапное форми-

рование различных кластеров, которые отличаются структурой и размерами [8]. На первом этапе формирования структуры хромоникелевых сплавов касающиеся кластеры образуют цепь, по которой в меньшей степени происходит рассеяние электронов проводимости, т.е. эффект протекания приводит к уменьшению электросопротивления системы. На втором максимуме структура соответствует системе, полностью состоящей из касающихся кластеров. На третьем максимуме наблюдается перекрытие кластеров.

После незначительного уменьшения электросопротивления в концентрационном интервале 12,5 – 20,0 % Cr наблюдается интенсивный рост  $\rho$  до четвертого максимума, что, по-видимому, связано с появлением в расплаве кластеров, близких по структуре  $Ni_2Cr$ . Возможность такого варианта обусловлена термодинамически неравновесными условиями нагрева и плавления исходных образцов.

Положение четвертого минимума на изотерме совпадает с эвтектической точкой на диаграмме состояния. Перед плавлением эвтектическая композиция, состоящая из двух обособленных  $\gamma$ - и  $\alpha$ -фаз, близка к термодинамическому равновесию [15]. Прочные поверхностные связи таких мелкодисперсных частиц создают условия, оказывающие существенное влияние на формирование структуры расплава. При этом объемные соотношения фаз эвтектики перед плавлением регулировать не удастся.

Дальнейшее увеличение концентрации хрома сопровождается интенсивным ростом электросопротивления, а строение кластеров стремится к индивидуализации  $\alpha$ -подобной структуры.

**Выводы.** Результаты исследований температурных и концентрационных зависимостей удельного

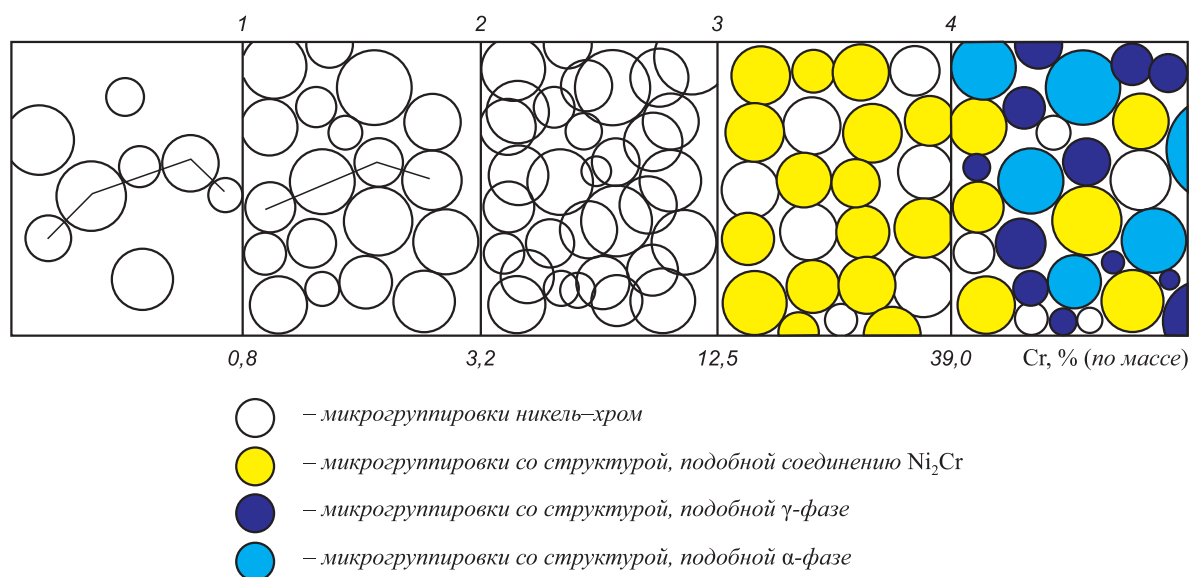


Рис. 3. Схематическое расположение микрогруппировок системы Ni–Cr

Fig. 3. Schematic arrangement of microgroups of Ni–Cr system

электросопротивления сплавов никеля и хрома позволяют определить оптимальные условия формирования микрооднородной и равновесной структуры расплава. Кроме этого, используя некоторые положения теории перколяции и квазихимического варианта модели микронееднородного строения жидких металлических сплавов, удастся качественно объяснить характер изменения волнообразной изотермы электросопротивления хромоникелевых расплавов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конструкционные материалы ядерных реакторов / Н.М. Бескорвайный, Б.А. Калинин, П.А. Платонов, И.И. Чернов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 704 с.
2. Гольдштейн М.И., Векслер Ю.Г., Грачев С.В. Специальные стали. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
3. Барышев Е.Е., Тягунов А.Г., Степанова Н.Н. Влияние структуры расплава на свойства жаропрочных никелевых сплавов в твердом состоянии. – Екатеринбург: НИСО УрО РАН, 2010. – 197 с.
4. Danis M., Cansever N. Effect of Cr content on mechanical and electrical properties of Ni–Cr thin films // *Journal of Alloys and Compounds*. 2010. No. 493. P. 649 – 653.
5. Rie Endo, Masaya Shima, Masahiro Susa. Thermal-Conductivity Measurements and Predictions for Ni – Cr Solid Solution Alloys // *Int. J. Thermophys.* 2010. No. 31. P. 1991 – 2003.
6. Glagoleva Yu.V., Pushkareva N.B., Lapshova Yu.E., Sadyreva O.V., Polev V.F., Gorbatov V.I., Taluts S.G., Korshunov I.G. Thermophysical and Transport Properties of Nickel – Chromium Alloys at High Temperatures // *The Physics of Metals and Metallography*. 2006. Vol. 102. No. 1. P. 48 – 54.
7. Свойства металлических расплавов: сборник. В 2 ч. Ч. 1. / В.С. Цепелев, В.В. Коначков, Б.А. Баум и др. – Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 2008. – 358 с.
8. Жидкая сталь / Б.А. Баум, Г.А. Хасин, Г.В. Тягунов и др. – М.: Металлургия, 1984. – 208 с.
9. Баум Б.А., Игошин И.Н., Шульгин Д.Б. и др. О колебательном характере процесса релаксации неравновесных металлических расплавов // *Изв. АН СССР. Расплавы*. 1988. Т. 2. № 5. С. 19 – 31.
10. Баум Б.А., Шульгин Д.Б., Буллер Т.П. Осциллирующий характер процесса релаксации металлической жидкости // *Месталлофизика*. 1989. № 5. С. 90 – 93.
11. Замятин В.М., Баум Б.А., Мезенин А.А., Шамакова К.Ю. Временные зависимости свойств расплавов, их значение, особенности и варианты объяснения // *Расплавы*. 2010. № 5. С. 19 – 31.
12. Thakor P.B., Patel J.J., Sonvane Y.A., Gajjar P.N., Jani A.R. Electrical resistivity of Ni–Cr liquid binary alloy // *Solid State Phenomena*. 2014. Vol. 209. P. 233 – 236.
13. Thakore B.Y., Suthar P.H., Khambholja S.G., Gajjar P.N., Bhatt N.K., Jani A.R. Temperature Dependent Electrical Transport Properties of Ni–Cr and Co–Cr Binary Alloys // *AIP Conference Proceedings*. 2011. No. 1393. P. 157 – 158.
14. Kostov A., Živkovic D. Thermodynamic properties calculation in Ni–Cr–Co liquid alloys using FactSage // *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*. 2011. No. 3(1). P. 34 – 52.
15. Курц В., Зам П.П. Направленная кристаллизация эвтектических материалов. – М.: Металлургия, 1980. – 272 с.

Поступила 10 февраля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 8, pp. 565–570.

## EFFECT OF CHROMIUM CONCENTRATION ON THE STRUCTURE FORMATION PROCESS OF LIQUID CHROME-NICKEL ALLOYS

A.G. Tyagunov<sup>1</sup>, V.V. V'yukhin<sup>1</sup>, G.V. Tyagunov<sup>1</sup>, E.E. Baryshev<sup>1</sup>, Yu.N. Akshentsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> M.N. Mikheev Institute of Metal Physics UB RAS, Ekaterinburg,  
Russia

**Abstract.** The temperature and concentration dependences of the electrical resistivity of the nickel-chromium alloys in the liquid state have been studied. Experimental data suggest a nonlinear concentration dependence of the electrical resistivity isotherms of the studied alloys. The results of studies of the temperature and concentration dependences of the electrical resistivity of nickel-chromium alloys allow determining the optimal conditions for the formation of microhomogeneous and the equilibrium structure of the melt. Using of percolation theory and quasicheical model of microheterogeneous structure of liquid metal alloys gives the possibility to explain the nature of the isotherms of the electrical resistivity of nickel-chromium melts. The process of structure formation of nickel-chromium melts with increasing chromium concentration has been presented in the form of schemes, reflecting the gradual formation of different clusters, featuring by their structure and size.

**Keywords:** temperature, concentration, liquid metal, nickel-chromium melts, time dependence, electrical resistivity, isotherm, structure, physical model.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-565-570

#### REFERENCES

1. Beskorovainyi N.M., Kalin B.A., Platonov P.A., Chernov I.I. *Konstruktivnye materialy yadernykh reaktorov* [Constructional materials of nuclear reactor]. Moscow: Energoatomizdat, 1995, 704 p. (In Russ.).
2. Gol'dshtein M.I., Veksler Yu.G., Grachev S.V. *Spetsial'nye stali* [Special steels]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 408 p. (In Russ.).
3. Baryshev E.E., Tyagunov A.G., Stepanova N.N. *Vliyaniye struktury rasplava na svoystva zharoprochnykh nikelovykh splavov v tverdom sostoyanii* [Influence of melt structure on the properties of heat-resistant nickel alloys in a solid state]. Ekaterinburg: NISO UrO RAN, 2010, 197 p. (In Russ.).
4. Danis M., Cansever N. Effect of Cr content on mechanical and electrical properties of Ni–Cr thin films. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010, no. 493, pp. 649–653.
5. Rie Endo, Masaya Shima, Masahiro Susa. Thermal-conductivity Measurements and predictions for Ni – Cr solid solution alloys. *Int. J. Thermophys.* 2010, no. 31, pp. 1991–2003.
6. Glagoleva Yu.V., Pushkareva N.B., Lapshova Yu.E., Sadyreva O.V., Polev V.F., Gorbatov V.I., Taluts S.G., Korshunov I.G. Thermophysical and transport properties of nickel-chromium alloys at high temperatures. *The Physics of Metals and Metallography*. 2006, vol. 102, no. 1, pp. 48–54.
7. Tsepelev V.S., Konashkov V.V., Baum B.A., Tyagunov G.V., Baryshev E.E. *Svoystva metallicheskiykh rasplavov: sbornik. V 2 ch. Ch. 1* [Properties of metal melt: Collected papers in 2 parts. Part 1]. Ekaterinburg: izd. UGTU-UPI, 2008, 358 p. (In Russ.).

8. Baum B.A., Khasin G.A., Tyagunov G.V., Klimenkov E.A., Bazin Yu.A., Kovalenko L.V., Mikhailov V.B., Raspopova G.A. *Zhidkaya stal'* [Liquid steel]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 208 p. (In Russ.).
9. Baum B.A., Igoshin I.N., Shul'gin D.B., Buler T.P., Bazin Yu.A., Gushchin V.S., Tret'yakova E.E., Matveev V.M., Rovbo M.V. On the vibrational nature of the relaxation process of nonequilibrium metal melts. *Izvestiya AN SSSR. Rasplavy*. 1988, vol. 2, no. 5, pp. 19–31. (In Russ.).
10. Baum B.A., Shul'gin D.B., Buller T.P. Oscillatory character of the relaxation process of metal liquids. *Mestallofizika*. 1989, no. 5, pp. 90–93. (In Russ.).
11. Zamyatin V.M., Baum B.A., Mezenin A.A., Shmakova K.Yu. Time dependences of melt properties, their meaning, peculiarities and the variants of explanation. *Rasplavy*. 2010, no. 5, pp. 19–31. (In Russ.).
12. Thakor P.B., Patel J.J., Sonvane Y.A., Gajjar P.N., Jani A.R. Electrical resistivity of Ni-Cr liquid binary alloy. *Solid State Phenomena*. 2014, vol. 209, pp. 233–236.
13. Thakore B.Y., Suthar P.H., Khambholja S.G., Gajjar P.N., Bhatt N.K., Jani A.R. Temperature Dependent Electrical Transport Properties of Ni-Cr and Co-Cr Binary Alloys. *AIP Conference Proceedings*. 2011, no. 1393, pp. 157–158.
14. Kostov A., Živkovic D. Thermodynamic properties calculation in Ni-Cr-Co liquid alloys using FactSage. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*. 2011, no. 3(1), pp. 34–52.
15. Kurz W., Sahn P.R. *Gerichtet erstarre eutektische Werkstoffe*. Springer-Verlag: Berlin-Heidelberg-New York, 1975. (Russ.ed.: Kurz W., Sahn P.R. *Napravlenaya kristallizatsiya evtekticheskikh materialov*. Moscow: Metallurgiya, 1980, 272 p.).

**Information about the authors:**

**A.G. Tyagunov**, *Cand. Sci. (Eng.)*, Head of the Chair of Polygraphy and Web-design (adi8@yandex.ru)

**V.V. Vyukhin**, *Senior Researcher of the Research Centre of Physics of Metallic Liquids of the Institute of Materials and Metallurgy* (v.v.vyukhin@urfu.ru)

**G.V. Tyagunov**, *Dr. Sci. (Eng.)*, Professor of the Chair of Life Safety (g.v.tyagunov@urfu.ru)

**E.E. Baryshev**, *Dr. Sci. (Eng.)*, Head of the Chair of Life Safety (e.e.baryshev@urfu.ru)

**Yu.N. Akshentsev**, *Cand. Sci. (Eng.)*, Senior Researcher (ayn@imp.uran.ru)

Received February 10, 2015