

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ [Ni_{1-x}, Co_x](Fe_{1-x}, Mo_x)₂O₄+NH₄ReO₄ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩЕГО СТАЛЬНОГО ПОРОШКА

С.Г. Агбальян, А.М. Оганесян, В.А. Симонян

Национальный политехнический университет Армении

Одним из приоритетных направлений современного материаловедения является создание материалов с высокими и функциональными свойствами. К числу таких материалов относятся мартенситно-стареющие стали, используемые в транспортной технике, машиностроении, авиастроении, судостроении, приборостроении, атомной энергетике, военной промышленности и т.д. В отличие от углеродистых сталей, мартенситно-стареющие стали более устойчивы к хрупкому разрушению, особенно при отрицательных температурах. Они хорошо обрабатываются резанием, подвергаются пластической деформации и термической обработке.

Исследованы механизм и кинетика восстановления шихты, изготовленной из сложного оксида [Ni_{1-x}, Co_x](Fe_{1-x}, Mo_x)₂O₄, синтезированного из оксидной системы Fe₂O₃-NiO-CoO-MoO₃, и перрената аммония (NH₄ReO₄). Выявлено, что рений, будучи очень активным, растворяется в системе Fe-Ni-Co-Mo, образуя твердые растворы и интерметаллические соединения, повышая прочность, твердость, ударную вязкость, теплостойкость, коррозионную стойкость и хладноломкость порошковой стали. Путем совмещения процессов синтеза и восстановления сложных оксидов разработана эффективная технология производства легированных металлических порошков, которая позволяет получать высокопрочные порошки мартенситно-стареющей стали со сверхчистым химическим составом, требуемыми структурой и свойствами. Показано, что полученный мартенситно-стареющий стальной порошок типа ПС-Н18К10М5Re чище по количеству примесей, чем литая сталь марки Н18К10М5 того же типа. Полученные порошки имеют более высокие физико-технологические свойства, чем стандартный стальной порошок.

Ключевые слова: оксиды, синтез, перренат аммония, шихта, восстановление, порошок мартенситно-стареющих сталей, прессуемость, спекание, твердые растворы, интерметаллические соединения.

Введение. Развитие современной техники, особенно в области военной промышленности, требует создания материалов с функциональными свойствами и, прежде всего, с высокой прочностью и пластичностью, а также структурно-чувствительными свойствами, ударной вязкостью, которые были бы

способны работать в условиях переменных нагрузок при высоких и низких температурах, особенно отрицательных. На основании комплекса перечисленных свойств у этих материалов повышаются предел текучести и усталостная прочность, а также способность работать при переменных нагрузках. К числу таких перспективных материалов относятся мартенситно-стареющие стали, которые используются в транспортной технике, авиастроении, судостроении, приборостроении, атомной энергетике, военной промышленности и т.д. [1-3]. Эти стали более устойчивы к хрупкому разрушению, чем углеродистые стали, особенно при отрицательных температурах. Они хорошо поддаются обработке резанием, легко деформируются и подвергаются термической обработке [2-7].

Так как мартенситно-стареющие стали по своему химическому составу являются сверхчистыми сплавами и не должны содержать углерода, водорода, кислорода, азота, серы, фосфора и других примесей, поэтому целесообразно указанные стали получать методом порошковой металлургии. Этот метод позволяет из оксидных компонентов синтезировать сложные оксиды [8, 9] и путем их восстановления получать стальной гомогенный порошок. После холодного прессования полученного стального порошка, спекания пористых прессовок и их горячей экструзии полученные беспористые заготовки подвергаются механической и термической обработке [3]. В качестве исходных материалов для легирования рением следует использовать оксиды высокой чистоты и перренат аммония. Полученная порошковая сталь имеет мелкозернистую структуру, высокие механические и технологические свойства, в том числе и эксплуатационные. Несмотря на это, создание легированных металлических порошков, в том числе порошков мартенситно-стареющих сталей, не позволяет осуществлять их массовое производство, особенно порошковых композиционных материалов.

Исходя из вышесказанного, **целью работы** является исследование механизма и кинетики восстановления шихты, изготовленной из сложного оксида $[\text{Ni}_{1-x}, \text{Co}_x](\text{Fe}_{1-x}, \text{Mo}_x)_2\text{O}_4$, синтезированного из оксидной системы $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--NiO--CoO--MoO}_3$, и перрената аммония (NH_4ReO_4), и разработка технологии получения высокопрочных мартенситно-стареющих стальных порошков.

Постановка задачи и обоснование методики. Мартенситно-стареющие стали - сверхчистые сплавы, которые характеризуются точным химическим составом [1, 2, 7]. Поэтому технология получения их порошка отличается от известных технологий получения порошковых сталей. Этот метод позволяет готовить шихту, легируя сложные оксиды рением в виде перрената аммония (NH_4ReO_4).

Согласно приведенной реакции



при восстановлении перрената аммония водородом получается рений высокой чистоты, который, будучи очень активным, растворяется в системе Fe-Ni-Co-Mo, образуя твердые растворы и интерметаллиды рения, повышая прочность, твердость, ударную вязкость, теплоемкость, коррозионную стойкость, хладноломкость порошковой стали. Особенность рения состоит в том, что, будучи металлом с плотной гексагональной структурой, он обладает высокой растворимостью в переходных металлах (до 65 ат. %), кристаллическая решетка которых объемно-центрированная кубическая.

Согласно работам [10, 11], если процесс восстановления оксидных систем осуществляется при высоком потенциале, то он будет протекать без деления. При обычном восстановлении с помощью H_2 происходит деление оксидов и имеет место селективное восстановление. А в оксидных системах, в которых не содержатся трудно восстанавливаемые оксиды, процесс восстановления проходит без осложнений. Оксидная система « $[\text{Ni}_{1-x}, \text{Co}_x](\text{Fe}_{1-x}, \text{Mo}_x)_2\text{O}_4$ », разработанная в работе [9], не подвергается делению, так как термодинамические потенциалы компонентов близки друг к другу. Поэтому она восстанавливается стальным порошком, в котором металлические компоненты смешаны в виде твердых растворов или интерметаллических соединений.

Эксперименты проводились на термогравиметрической установке, которая дает возможность постоянно контролировать изменение массы образца, поддерживая постоянной требуемую температуру. Степень восстановления определяли по потере массы оксидных образцов и скорости их восстановления.

Результаты исследования. Для получения мартенситно-стареющего стального порошка состава 18%Ni+10%Co+5%Mo+0,7%Re+Fe_{мн} на термогравиметрической установке была восстановлена шихта состава 99% $[\text{Ni}_{1-x}, \text{Co}_x](\text{Fe}_{1-x}, \text{Mo}_x)_2\text{O}_4$ +1% NH_4ReO_4 , приготовленная механическим перемешиванием в течение 1,5...2,0 ч.,

Результаты исследования представлены на рис. 1 и 2. Как видно из рисунков, восстановление полученного сложного оксида $[\text{Ni}_{1-x}, \text{Co}_x](\text{Fe}_{1-x}, \text{Mo}_x)_2\text{O}_4$ проводится без деления - в одну стадию, а также не наблюдается никаких эффектов, связанных с кристаллохимическими превращениями. Однако четко выделяются прямолинейные и параболические диапазоны. Эксперименты показывают, что процесс восстановления идет сначала в кинетическом, а потом в диффузионном режиме. Из рис. 1 видно, что при

температуре 850°C в течение вытяжки 1 ч (рис. 1, кривая 1) происходит полное восстановление.

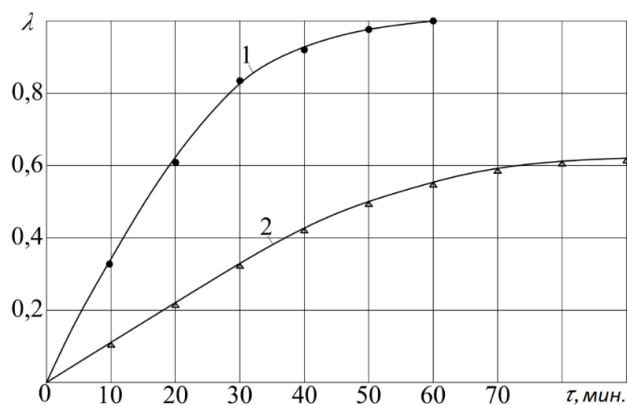


Рис. 1. Зависимость степени восстановления (λ) шихты состава 99% $[\text{Ni}_{1-x}, \text{Co}_x](\text{Fe}_{1-x}, \text{Mo}_x)_2\text{O}_4 + 1\% \text{NH}_4\text{ReO}_4$ от срока выдержки (τ , мин): кривая 1 - 850°C , кривая 2 - 650°C

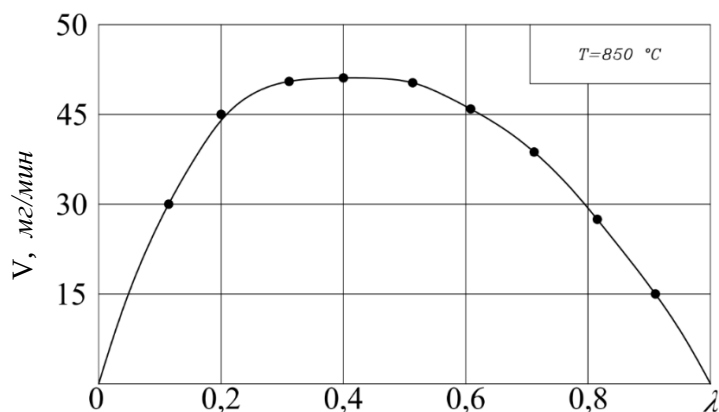
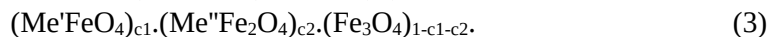
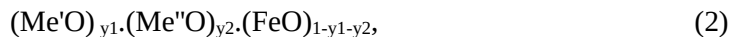


Рис. 2. Дифференциальная кривая восстановления шихты состава 99% $[\text{Ni}_{1-x}, \text{Co}_x](\text{Fe}_{1-x}, \text{Mo}_x)_2\text{O}_4 + 1\% \text{NH}_4\text{ReO}_4$

Выявлено, что механизм восстановления оксидных систем достаточно сложный и объясняется следующим образом. В процессе восстановления оксида $\text{Me}^{2+}\text{Fe}_2\text{O}_4$ образуются фазы переменного состава, причем Fe^{2+} способен полностью или частично заменить Me^{2+} . В первом приближении сложный оксид $\text{Me}'_c\text{Me}''_{(1-c)}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ эквивалентен твердому раствору $(\text{Me}'\text{Fe}_2\text{O}_4)_c \cdot (\text{Me}''\text{Fe}_2\text{O}_4)_{1-c}$ с комплексными соединениями. При восстановлении они

образуют твердые растворы (закиси) или шпинельные фазы переменного состава:



Состав твердого раствора и давление кислорода зависят от состава Me' и Me'' . Механизм восстановления оксида $\text{Me}'_c\text{Me}''_{(1-c)}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4$ (или $\text{MeMe}^{3+}_{(2-x)}\text{Fe}_x\text{O}_4$) можно представить следующим образом. До степени восстановления $\lambda = 33\%$ происходит быстрый переход Me^{2+} из шпинельной фазы в закисную фазу. Одновременно Fe^{3+} восстанавливается до Fe^{2+} , большая часть которого замещает удаленный из шпинельной фазы Me^{2+} , а избыток Fe^{2+} также переходит в закисную фазу типа твердых растворов. Поэтому количество MeFe_2O_4 в шпинельной фазе уменьшается. В результате образуется новый компонент Fe_3O_4 (магнетит), концентрация которого достигает $\sim 70\%$ при $\lambda = 20\%$. Закисная фаза обедняется FeO . При степени восстановления больше 33% закисный твердый раствор полностью обедняется кислородом до чистого металла, т.е. образуется металлический сплав. Для выбора оптимального режима восстановления (T , τ) испытаны порошки массой до 1 кг . Толщина насыпного слоя порошка в виде оксида составляла $\sim 25 \text{ мм}$. Результаты экспериментов представлены на рис. 3.

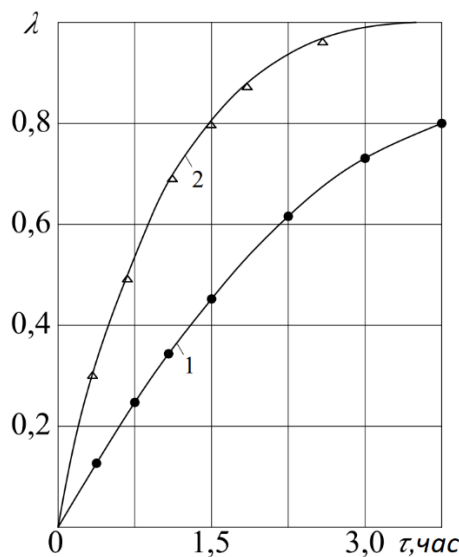


Рис. 3. Кинетика восстановления шихты состава $99\% [\text{Ni}_{1-x}, \text{Co}_x](\text{Fe}_{1-x}, \text{Mo}_x)_2\text{O}_4 + 1\% \text{NH}_4\text{ReO}_4$ при температурах: кривая 1 - 850°C , кривая 2 - 950°C

Как видно из рисунка, при $T=950^{\circ}\text{C}$ и продолжительности $\tau=3$ ч (кривая 2) происходит полное восстановление (100%), а при 850°C - восстановление недостаточно и составляет 80%.

По методике [12] проведен химический анализ полученного металлического порошка. Содержание кислорода определяли по потере массы при спекании пористых прессовок в среде водорода (ГОСТ 18897-73).

Гранулометрический состав восстановленного порошка определяли по ГОСТ 18318-73 с помощью ситового анализа, пикнометрическую плотность - с помощью пикнометра по ГОСТ 18898-73, насыпную плотность - с помощью волюмометра по ГОСТ 19440-74, а форму зерна - с помощью оптического микроскопа. За насыпную плотность принимали среднее из трех результатов измерений, разница которых не превышала +1,5%. Сыпучесть металлических порошков определяли по ГОСТ 20899-75 и рассчитывали по формуле $\varepsilon=K \cdot \tau$, где K - коэффициент соответствия, а τ - время течения металлического порошка (с).

Согласно ГОСТ 25280-82, определяли плотность и формуемость металлических порошков, т.е. прессуемость. Оптимальные режимы прессования выбирали из кривой прессования металлических порошков, построенной в системе координат "остаточная пористость - давление прессования", т.е. $\theta = f(P)$. Формование металлических порошков характеризовалось определенным диапазоном пористости ($\theta = 20...25\%$), при котором на поверхности прессовок после снятия с пресс-формы не появляются трещины.

В табл. 1-3 приведены химический и гранулометрический составы, а также основные свойства мартенситно-старяющего стального порошка марки ПС-Н18К10М5Re, полученного по разработанной технологии.

Таблица 1

Химический состав мартенситно-старяющего стального порошка типа ПС-Н18К10М5Re

Марка стали	Химический состав, %								
	основные элементы					примеси, не более			
	Fe	Ni	Mo	Co	Re	C	Si	S	P
ПС-Н18К10М5Re	ост. 18,3	17,8... 18,3	4,8... 5,2	9,8... 10,2	0,6... 0,7	0,001	0,002	0,003	0,002
Н18К10М5 (стандарт)	ост.	17,7... 19,0	4,6... 5,5	9,5... 10,5	-	0,03	0,200	0,020	0,020

Как показали химические анализы, полученные мартенситно-старяющие стальные порошки марки ПС-Н18К10М5Re чище по количеству примесей по

сравнению со стандартной сталью марки H18K10M5. Это объясняется тем, что при ферритизации оксидных смесей (Fe_2O_3 , NiO , CoO , MoO_3) они легко хлорируются и испаряются, что обусловлено их высокой упругостью пара. Удаление смеси из перрената аммония (NH_4ReO_4) также легко осуществляется при восстановлении шихты.

Таблица 2

Гранулометрический состав мартенситно-старееющего стального порошка типа ПС-H18K10M5Re

Гранулометрический состав, % по массе				
-0,160...+0,125 мм	-0,125...+0,100 мм	-0,100...+0,080 мм	-0,080...+0,040 мм	-0,040 мм
8,7	9,5	12,1	18,2	51,5

Таблица 3

Свойства мартенситно-старееющего стального порошка марки ПС-H18K10M5Re

Пикнометрическая плотность, г/см ³	Насыпная плотность, г/см ³	Сыпучесть, с/50г	Уплотняемость при Р=700, МПа, г/см ³	Прессуемость, г/см ³ (нижний предел)
8,15	2,6	38,0	6,7	4,5

Эта технология имеет одно преимущество, заключающееся в том, что исключается азотирование металлического порошка ($\text{NH}_4\text{Cl} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{HCl}$), при этом как исходные, так и синтезированные оксиды и перренат аммония не азотируются, что объясняется высоким кислородным потенциалом оксидов и перрената аммония, по сравнению с потенциалом азота. Как показали химические анализы, нитридов не обнаружено.

Комплекс проведенных исследований показал, что полученный мартенситно-старееющий стальной порошок характеризуется хорошей плотностью и прессуемостью (рис. 4). Форма полученного порошка губчатая (рис. 5), что характерно для восстановленных порошков [13].

На рис. 6 показаны результаты рентгеноспектрального микрозондового анализа. Как видно из рисунка, распределение элементов: Ni (рис. 6 а), Co (рис. 6 б), Mo (рис. 6 в) и Re (рис. 6 г) относительно равномерное. Необходимо отметить, что при спекании пористых заготовок, их горячей экструзии, отжиге полученных заготовок и дальнейшей термической обработке готовых изделий

также происходят процессы гомогенизации, и распределение легирующих элементов становится равномерным по всему объему.

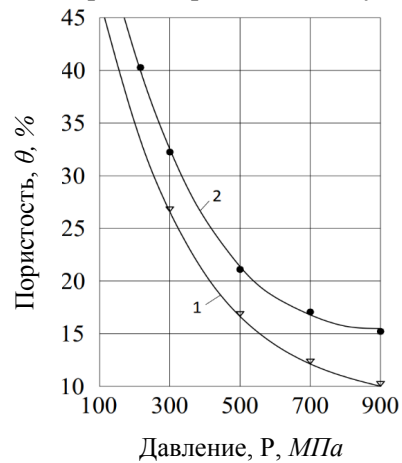


Рис. 4. Диаграмма прессуемости мартенситно-старееющего стального порошка марки ПС-Н18К10М5Re - $\theta=f(P)$, полученного: кривая 1 - синтезом и восстановлением оксидов, кривая 2 - методом термодиффузии



Рис. 5. Форма зерна мартенситно-старееющего стального порошка Марки ПС-Н18К10М5Re ($\times 100$)

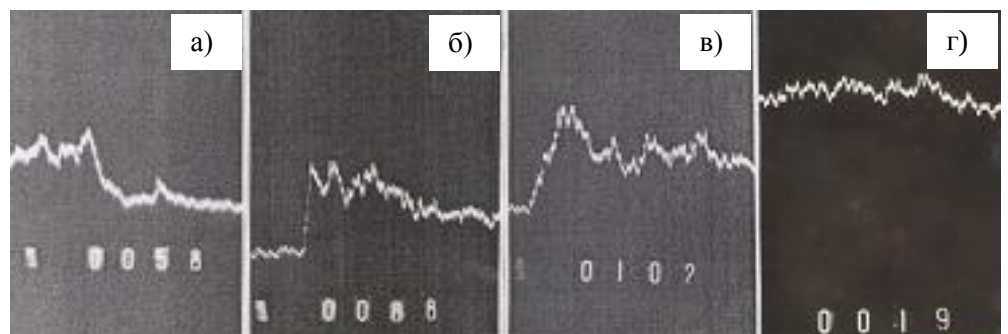


Рис. 6. Результаты рентгеноспектрального микрозондового анализа стального порошка типа ПС-Н18К10М5Re: а – Ni, б – Co, в – Mo, г – Re

Заклучение. Выявлены механизм и кинетика восстановления шихты, полученной из сложного оксида $[\text{Ni}_{1-x}, \text{Co}_x](\text{Fe}_{1-x}, \text{Mo}_x)_2\text{O}_4$, синтезированного из оксидной системы $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--NiO--CoO--MoO}_3$, и перрената аммония (NH_4ReO_4). Показано, что полученный стальной порошок марки ПС-Н18К10М5Re чище по количеству примесей, чем литая сталь такого типа. Выявлено, что рений, будучи очень активным, растворяется в системе Fe-Ni-Co-Mo, образуя твердые растворы и интерметаллические соединения, повышая прочность, твердость, ударную вязкость, теплостойкость, коррозионную стойкость и хладноломкость порошковой стали.

На основании проведенных комплексных исследований разработана новая технология получения высокопрочных мартенситно-старееющих стальных порошков, имеющих высокие физико-технологические свойства.

Литература

1. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали: Учебник для вузов. - М.: Металлургия, 1985. - 408 с.
2. Агбальян С.Г., Салтыкова Ев.С. Специальные стали и сплавы: Учебное пособие. - Ереван: Изд-во ГИУА, 2003. - 260 с.
3. Бадеян Б.Ф. Разработка мартенситно-старееющих порошковых сталей и процессов их получения: Дис. канд. техн. наук. - Ереван, 1994. - 130 с.
4. Получение порошковых мартенситно-старееющих сталей / С.Г. Агбальян, Б.Ф. Бадеян, Р.Г. Самвелян и др. // Порошковая металлургия. - Киев, 1994. - N 9/10. - С. 7-15.
5. Формование структуры и свойств мартенситно-старееющих порошковых сталей, полученных экструзией / С.Г. Агбальян, Б.Ф. Бадеян, С.А. Ассила и др. // Порошковая металлургия. - Киев, 1994. - N 11/12. - С. 10-13.
6. Низколегированные порошковые стали, полученные по металлооксидной технологии / С.Г. Агбальян, С.А. Ассила, Н.Н. Манукян и др. // Порошковая металлургия. - Киев, 1995. - N 1/2. - С. 5-10.
7. Бодяко М.Н., Астанчик С.А., Ярошевич Ф.Б. Мартенситно-старееющие стали. - Минск: Наука и техника, 1976. - 248 с.
8. Աղբալյան Ս.Գ. Սիմոնյան Վ.Ա. Մարտենիտային ծերացող փոշեպողպատների ստացման տեխնոլոգիայի հիմնավորումը // ՀՀ ԳԱԱ ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. - 2022. - Том 75, N 3. - էջ 342-354:
9. Агбальян С.Г., Симонян В.А., Арутюнян Ю.В. Исследование процесса ферритизации в оксидных системах $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--NiO--CoO--MoO}_3$ и разработка технологии получения сложных оксидов // Вестник НПУА: Химические и природоохранные технологии. - Ереван, 2022. - N 2. - С. 32-45.
10. Тумарев А.С. Проблемы металлургии. - М.: Металлургия, 1953.

11. Механизм и кинетика восстановления металлов / **Г.И. Чуфаров и др.**- М.: Наука, 1970.
12. **Строганов А.И., Рысс М.А.** Производство стали и ферросплавов.- М.-Л.: Металлургия, 1979.- 504 с.
13. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / **В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др.**- М.: Металлургия, 1987.- 792 с.

Поступила в редакцию 25.08.2022.

Принята к опубликованию 08.02.2022.

**[Ni_{1-x}, Co_x](Fe_{1-x}, Mo_x)₂O₄ + NH₄ReO₄ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՎԵՐԱԿԱՆԳՆՄԱՆ
ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՎ ՄԱՐՏԵՆՍԻՏԱՅԻՆ ԾԵՐԱՑՈՂ
ՊՈՂՊԱՏԱՓՈՇՈՒ ՍՏԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Ս.Գ. Աղբալյան, Ա.Մ. Հովհաննիսյան, Վ.Ա. Սիմոնյան

Բարձր և ֆունկցիոնալ հատկություններով օժտված նյութերի ստեղծումը ժամանակակից նյութագիտության առաջնային ուղղություններից է: Նշված նյութերից են մարտենսիտային ծերացող պողպատները, որոնք օգտագործվում են տրանսպորտային տեխնիկայում, ինքնաթիռաշինությունում, նավաշինությունում, սարքաշինության մեջ, ատոմային էներգետիկայում, ռազմական արդյունաբերությունում և այլուր: Ի տարբերություն ածխածնային պողպատների՝ մարտենսիտային ծերացող պողպատներն ավելի կայուն են փխրուն քայքայման նկատմամբ, հատկապես բացասական ջերմաստիճաններում: Այս պողպատները լավ մշակվում են կտրմամբ, հեշտ դեֆորմացվում են և ենթարկվում ջերմային մշակման:

Հետազոտվել են Fe₂O₃-NiO-CoO-MoO₃ օքսիդային համակարգից սինթեզված [Ni_{1-x}, Co_x](Fe_{1-x}, Mo_x)₂O₄ բարդ օքսիդի և ամոնիումի պերոենատից (NH₄ReO₄) պատրաստված բովախառնուրդի վերականգնման մեխանիզմն ու կինետիկան: Բացահայտվել է, որ ռենիումը, լինելով ակտիվ մետաղ, լուծվում է Fe-Ni-Co-Mo համակարգում՝ առաջացնելով պինդ լուծույթներ և ռենիումի ինտերմետաղական միացություններ, բարձրացնելով փոշեպողպատի ամրությունը, կարծրությունը, հարվածային մածուցիկությունը, ջերմակայունությունը, կոռոզիակայունությունը և սառնաբեկունությունը: Արդյունքում, զուգակցելով բարդ օքսիդների սինթեզի և վերականգնման գործընթացները, մշակվել է լեգիրված մետաղափոշիների արտադրության արդյունավետ տեխնոլոգիա, որն ապահովում է գերմաքուր քիմիական բաղադրությամբ և պահանջվող կառուցվածքով ու հատկություններով օժտված բարձրամուր մարտենսիտային ծերացող պողպատափոշիների ստացում: Ցույց է տրված, որ ստացված PC-H18K10M5Re մակնիշի մարտենսիտային ծերացող պողպատափոշին խառնուրդների քանակով ավելի մաքուր է, քան H18K10M5 մակնիշի նույն տեսակի ձուլված պողպատը: Պողպատափոշիներն իրենց ֆիզիկա-

տեխնոլոգիական հատկություններով չեն զիջում ստանդարտ պողպատափոշուն, իսկ որոշ դեպքերում գերազանցում են նրան:

Առանցքային բառեր. օքսիդներ, սինթեզ, ամոնիումի պերոտենատ, բովախառնուրդ, վերականգնում, մարտենսիտային-ծերացող պողպատի փոշի, մամլունակություն, եռակալում, պինդ լուծույթներ, ինտերմետաղական միացություններ:

RESEARCH OF THE $[\text{Ni}_{1-x}, \text{Co}_x](\text{Fe}_{1-x}, \text{Mo}_x)_2\text{O}_4 + \text{NH}_4\text{ReO}_4$ SYSTEM RECOVERY PROCESS AND DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR OBTAINING A MARAGING STEEL POWDER

S.G. Aghbalyan, A.M. Hovhannisyan, V.A. Simonyan

One of the priority areas of modern material science is creation of materials with high and functional properties. These materials include maraging steels used in transport technology, mechanical engineering, aircraft building, shipbuilding, instrument making, nuclear power, military industry, etc. Unlike carbon steels, these steels are more resistant to brittle fracture, especially at low temperatures. Maraging steels are well processed by cutting, undergoing plastic deformation and heat treatment.

The mechanism and kinetics of restoration of a charge made from complex oxide $[\text{Ni}_{1-x}, \text{Co}_x](\text{Fe}_{1-x}, \text{Mo}_x)_2\text{O}_4$, synthesized from oxide system $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--NiO--CoO--MoO}_3$, and ammonium perrhenate (NH_4ReO_4) are studied. It is found that rhenium, being very active, dissolves in the Fe-Ni-Co-Mo system, forming solid solutions and intermetallic rhenium compounds, increasing the strength, hardness, impact strength, heat resistance, corrosion resistance and cold brittleness of the powder steel. By combining the processes of synthesis and reduction of complex oxides, an effective technology for the production of alloyed metal powders has been developed, which makes it possible to obtain high-strength powders of maraging steel with an ultrapure chemical composition required by the structure and properties. It is shown that the resulting maraging steel powder of the ПС-Н18К10М5Re type is cleaner in terms of the amount of impurities than cast steel of the H18K10M5 grade of the same type. The resulting powders have higher physical and technological properties than the standard steel powder.

Keywords: oxide system, synthesis, ammonium perrhenate, mixture, restoration, maraging steel powder, compressibility, sintering, solid solutions, intermetallic compounds.