

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АМОРФНЫХ СПЛАВОВ НА СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НИТЕЙ

**М.Н. Верещагин, Г.Г. Горанский, М.М. Овчинникова, М.Ю. Целуев**  
*Гомельский политехнический институт им.П.О.Сухого, Беларусь*

Ближний порядок, а также его топологическая и химическая составляющие играют ключевую роль в понимании изменения атомной структуры при легировании и нагреве аморфных сплавов. В сплавах ТМ-М (ТМ- переходной металл, М- металлоид) максимальная устойчивость соответствует эвтектическим точкам равновесных диаграмм состояния.

Влияние легирования на кристаллизацию нужно проследивать с момента образования нескольких типов ассоциатов, образующихся при усложнении химического состава сплава. При этом определяющую роль при образовании аморфной структуры играет сильное межатомное взаимодействие между разнородными атомами расплава. Образование в структуре новых ассоциатов может создать кинетически выгодные условия для изменения типа кристаллизации в процессе нагрева сплава.

На повышение стабильности структуры наиболее действенным способом является соответствующий подбор легирующих компонентов. Бор является наиболее эффективной легирующей добавкой в сплавах на основе железа. В сравнении с кремнием, фосфором и углеродом его влияние на прочностные свойства в этом состоянии наиболее высокое. Оптимальная концентрация бора в сплавах системы железо- бор- кремний составляет 3,7- 4,5 % (мас). Эффективной заменой бора является кремний. Фосфор, углерод и германий дают менее заметный эффект на стабильность структуры и свойств аморфных сплавов. Увеличение силы межатомной связи в аморфных сплавах приводит к снижению подвижности атомов (ослабление диффузии), что обеспечивает повышение температуры кристаллизации сплавов, а также стабильность структуры. Повышают температуру кристаллизации и другие элементы, стоящие левее железа в периодической системе элементов. Высокую прочность и твердость имеют аморфные сплавы на основе железа при легировании молибденом, хромом и бором. Углерод по влиянию на механические свойства уступает только бору. При дополнительном введении углерода в сплавы железо-бор-кремний прочность возрастает. Оптимальная концентрация углерода в таких аморфных сплавах составляет 0,5-1,2% (мас). Широко используемой легирующей добавкой в сплавы на основе железа является фосфор. Однако

прочностные свойства таких сплавов уступают другим аморфным сплавам. Можно рекомендовать его использование в комплексе с другими легирующими добавками. Кремний и алюминий повышают устойчивость аморфного состояния в сплавах на основе железа и бора. В комплексных сплавах, содержащих два или более металлоидов, в широкой области концентраций образуются сложные метастабильные фазы. Заметное повышение механических свойств наблюдается в комплексных сплавах на основе Fe и В при легировании Mo и Mn. В сплавах Fe-Mo-C при низком содержании C (до 0,2% (мас.)) выделяется Mo<sub>2</sub>C, а при повышении концентрации углерода до 0,5-1,2% (мас.), преимущественно выделяются карбиды Mo<sub>6</sub>C и Mo<sub>23</sub>C<sub>6</sub>.

В качестве перспективных конструкционных материалов с повышенными механическими свойствами были выбраны сплавы на железной основе эвтектического состава: композиции Fe-B легированный Ni, Co, Cr, Mo, C и Fe-P-C легированный Si и Al. Температура плавления эвтектики соответственно равнялась 1150°C и 1030°C. Сплавы были получены методом вакуумного переплава шихты соответствующего состава. Высокопрочные нити были получены методом быстрой закалки расплава. Температура расплава фиксировалась с помощью прецизионного пирометра "Крок-2" с погрешностью измерения  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Угловая скорость вращения медного кристаллизатора составляла 50-120 с<sup>-1</sup> и фиксировалась датчиком оборотов модели ПДФ-1 в системе управления электроприводом типа СЭУ-7585. Механические свойства экспериментальных образцов высокопрочных прецизионных сплавов определялись путем испытаний на растяжение на универсальной испытательной машине модели 1195 "Инстрон", а химический анализ сплавов - на сканирующем микроскопе "Нанолаб-7" со специальной приставкой с рентгеновским излучением. Дифференциальный термический анализ для определения термической стабильности аморфной структуры выполнялся на установке ДТА, а микротвердость образцов определялась на микротвердомере MKV-D. Рентгеноструктурный и рентгенофазный анализ образцов в процессе изотермического отжига выполнялся на дифрактомере "Дрон-3" в монохроматизированном излучении в дискретном режиме с шагом сканирования 0,1° и постоянной величиной времени набора импульсов в точке. В качестве эталона брались сплавы указанных композиций, отожженные в вакууме при 850°C. Идентификация фаз, присутствующих в материале, проводилась расчетом межплоскостных расстояний по интерференционным пикам с последующим сравнением полученных значений с таблицами картотеки ASTM.

Оценен уровень физико-механических характеристик образцов, полученных при различных скоростях охлаждения расплава. Определены условия кристаллизации материала, а также сопутствующие этому процессу изменения фазового состава при последующем изотермическом отжиге.

В выбранном диапазоне режимов быстрой закалки расплавов материалы выбранных композиций являются полностью аморфными, о чем свидетельствует размытие всех дифракционных максимумов. Прочность и твердость материалов возрастает с увеличением скорости закалки. Для сплава железо- бор, легированного Ni, Co, Cr, Mo, C были получены следующие характеристики:  $\sigma_a=5,1-10,1$  ГПа,  $H_m=8,9-11,5$  ГПа,  $\delta=4,5-5\%$ ,  $T_m=510-580^\circ\text{C}$ ,  $V_{охл}=(2\div 6)\times 10^5$  °C/с. Сплав системы железо- фосфор- углерод с добавками Si и Al имел соответственно  $\sigma_a=4,2-4,5$  ГПа,  $H_m=6400-7500$  МПа,  $\delta=2-3\%$ ,  $T_m=435-450^\circ\text{C}$ ,  $V_{охл}=4\times 10^5$  °C/с.

Выполненный рентгеноструктурный анализ свидетельствует, что для структур типа ферритно- перлитная смесь разной степени дисперсности состав сплава близок к следующему: твердый раствор  $\alpha$ -Fe, цементит Fe<sub>3</sub>C, Mo<sub>6</sub>C, Mo<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, бориды железа FeB, Fe<sub>2</sub>B, Fe<sub>3</sub>B, Fe<sub>4</sub>B<sub>3</sub>, комплексные соединения (Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, FeC<sub>2</sub>O<sub>4</sub> и др. Образование мартенсита в процессе увеличения скорости охлаждения приводит к резкому повышению

содержания твердого раствора на основе  $\alpha$ -Fe и снижению содержания цементита. При полной аморфизации образца структура фактически не травится, а последняя четко фиксируется по результатам рентгеноструктурного анализа. Если по мере роста дефектности структуры уширение дифракционных максимумов увеличивается монотонно, то в момент полной аморфизации дифракционный максимум исчезает и растягивается в сплошной непрерывный спектр. При относительно малых скоростях охлаждения расплава уширение линий (200) и (211) монотонно возрастает, свидетельствуя об увеличении степени дефектности структуры (рост плотности дислокаций, дробление блоков когерентного рассеяния, рост микронапряжений кристаллической решетки). Для сплава Fe-P-C, легированного Al и Si имеет место следующий структурный состав: тройной твердый раствор в  $\alpha$ -Fe(C,P);  $\alpha$ -Fe(C,P)+Fe<sub>3</sub>C, фосфидная эвтектика типа  $\alpha$ -Fe(C,P)+Fe<sub>3</sub>C+Fe<sub>3</sub>P и тройная эвтектика  $\gamma$ -Fe(C,P)+ Fe<sub>3</sub>C+Fe<sub>3</sub>P. Фосфор при низком содержании углерода способствует дисперсионному твердению, повышая предел текучести, значительно повышает твердость, но уменьшает пластичность и вязкость. Фосфор улучшает литейные свойства (жидкотекучесть) за счет образования относительно легкоплавкой тройной эвтектики, повышая общую износостойкость сплава. Добавление Al в сплав измельчает зерно, снижает хрупкость и повышает ударную вязкость при относительно невысоких температурах плавления.