

ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЫСТРОЗАКАЛЕННОГО СПЛАВА НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ В ПРОЦЕССЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА

Т. С. Мельник, Е. С. Володькина

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Беларусь*

Научный руководитель С. Н. Целуева

Аморфные металлические сплавы – новый класс материалов, представляющих собой одну из последних инноваций XX в. Важной характеристикой аморфных сплавов является устойчивость их структуры и механических свойств по отношению к различным термическим воздействиям. Ограничения, связанные с практическим применением быстрозакаленных материалов, часто обусловлены нежелательными структурными изменениями при переходе в результате нагрева из аморфного в стабильное кристаллическое состояние. Поэтому с практической точки зрения интересно определение температурных интервалов стабильности механических свойств аморфных материалов.

Методика получения волокон и проведения исследований. В качестве исходных материалов для получения аморфных металлических лент в процессе высокоскоростной закалки расплава использовались прецизионные сплавы на железной основе следующего состава: Fe–Ni–Co–Cr–Mo–B–Si.

Получение быстрозакаленных лент из аморфизируемых сплавов осуществлялось на экспериментальной установке для спиннингования металлического расплава. После реализации процессов быстрой закалки металлического расплава изучали структуру, физико-химические и механические свойства быстрозакаленных изделий в исходном состоянии и после изотермического отжига, который был выполнен для двух разнотолщинных лент при температурах кристаллизации. Время отжига менялось с целью последующей оценки кинетики кристаллизации аморфного материала. Изотермический отжиг образцов выполнялся в вакуумной электропечи СНВ-1.31 при скорости набора температуры 5 °/мин. Степень вакуумирования – $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па. Время отжига при фиксируемой температуре составляло 30 мин. Рентгеноструктурный и рентгенофазный анализы выполнены на дифрактометре ДРОН-3 в монохроматическом CoK_α излучении.

Исследование физико-механических свойств быстрозакаленного сплава на железной основе в процессе изотермического отжига. При исследовании характера изменения микроструктуры исследуемого сплава в процессе кристаллизации аморфной фазы методом оптической микроскопии, было выявлено, что в медленно закаленном материале на конечных этапах кристаллизации наблюдаемое число обра-

зовавшихся кристаллов велико, их размеры относительно небольшие, и, напротив, в быстро закаленном материале образовавшихся кристаллов заметно меньше, а их размеры – большие. Методами рентгеноструктурного и рентгенофазового анализов оценено содержание кристаллической фазы и особенности кристаллизующихся фаз на различных этапах изотермического отжига быстрозакаленных лент.

На ранних стадиях изотермического отжига быстрозакаленных лент при температуре кристаллизации идет увеличение общего количества ограниченных твердых растворов Fe–Mo, Fe–B, Fe–Si, Ni–Cr и непрерывных твердых растворов аустенитного класса Fe–Ni, Fe–Co, Fe–Cr. Кинетика их роста соответствует значениям n от ~ 2 до ~ 3 в уравнении Джонсона–Мела–Автами (ДМА), что свидетельствует [1] о первичной гетерогенной кристаллизации за счет роста с постоянной скоростью присутствующих в аморфной матрице закалочных зародышей. Появление интерметаллидных σ -фазы (FeCr), λ -фазы (FeCrMo), борида Fe₂B происходит примерно через 10 минут отжига, тогда как бориды Ni₂B, Co₂B, силицид FeSi начинают формироваться лишь через 15...20 мин. Дальнейший рост химических соединений идет практически с постоянными скоростями, что позволяет утверждать о преобладающем эвтектическом характере процесса их формирования. В целом для образцов, закаленных с разной скоростью, в кинетике формирования кристаллических фаз имеются определенные отличия. Общая кинетика роста для быстрее и менее закаленного сплава описывается уравнением Д–М–А с показателем роста 2,31 и 1,98 соответственно. Согласно установившемуся мнению [1], все вышесказанное свидетельствует о наличии в медленнее закаленном материале существенно большего количества исходных закалочных зародышей.

Изотермический отжиг изменяет структуру аморфного сплава, что отражается на его механических характеристиках (рис. 1).

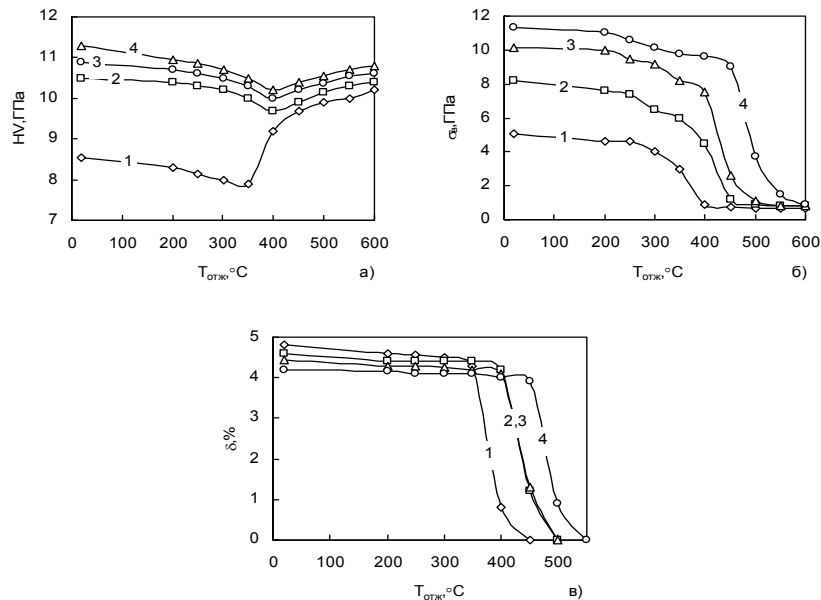


Рис. 1. Зависимость микротвердости HV (а), предела прочности σ_b (б) и относительного удлинения δ (в) быстрозакаленных образцов различной толщины h от температуры $T_{отж}$ изотермического отжига:
 1 – $h = 56$ мкм; 2 – $h = 51$ мкм; 3 – $h = 47$ мкм; 4 – $h = 42$ мкм

Структурные изменения, вызванные низкотемпературным ($T_{отж} < T_{кр}$) отжигом быстрозакаленных образцов, связаны с атомными перестройками без диффузии на значительные расстояния с сохранением микроскопически аморфного состояния материала, в связи с чем на зависимостях механических свойств от температуры отжига (рис. 1) вплоть до $T_{отж} = 350...400$ °С микротвердость и предел прочности образцов плавно снижаются по мере релаксации неравновесной структуры сплава, а пластичность остается практически постоянной. В интервале низкотемпературного отжига образцы наследуют свойства исходного быстрозакаленного сплава.

С увеличением температуры изотермического отжига ($T_{отж} \geq T_{кр}$) развивается кристаллизация аморфной фазы, что приводит к катастрофическому падению пластичности и прочности и некоторому росту микротвердости сплава.

В исходном быстрозакаленном состоянии ($T_{отж} = 20$ °С) с увеличением скорости закалки из расплава прочность и твердость исследуемого сплава существенно увеличиваются, а пластичность незначительно снижается. Очевидно, что указанные различия в механических свойствах лент обусловлены структурными изменениями в строении сплава, связанными с различными условиями получения быстрозакаленных образцов.

Зависимость температуры кристаллизации, оцененной по температуре начала экзотермического эффекта, от толщины быстрозакаленных лент (рис. 2) свидетельствует, что термическая стабильность аморфной структуры увеличивается с ростом скорости закалки расплава, которая применительно к процессу спиннингования обратно пропорциональна квадрату толщины образца [2].

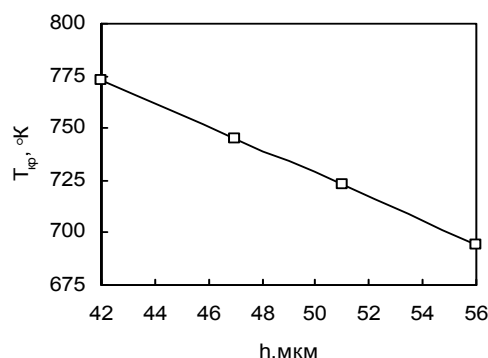


Рис. 2. Зависимость температуры $T_{кр}$ кристаллизации аморфного сплава от толщины h быстрозакаленных образцов

Увеличение температур кристаллизации при ДТА с ростом скорости закалки из расплава свидетельствуют о наличии в строении их материала определенных отличий, повлекших за собой возрастание термической стабильности аморфной структуры.

Оценивая результаты ДТА образцов сплавов, закаленных с разной скоростью, в процессе изотермического отжига, можно видеть, что материалы обладают высокой температурной стабильностью вплоть до температуры 400...500 °С. При данной температуре имеет место резкое падение удельного электросопротивления ρ . Изменение ρ зависит от природы сплава. Непрерывные твердые растворы (системы Fe–Ni, Fe–Co, Fe–Cr) и ограниченные твердые растворы (системы Fe–Mo, Fe–B, Fe–Si, Ni–Cr) отражают в полном соответствии с характером диаграмм состояние закономерности изменения электрических свойств. Предел прочности сплавов также подвержен изменению с ростом температуры отжига (рис. 1, б). По мере повышения температуры, независимо от скорости охлаждения расплава, имеет место постепенное уменьшение σ_b , однако

степень разупрочнения сплава различна в зависимости от условий получения, превращений в твердом состоянии, фазового строения. Сохранение прочности химической связи между разнородными атомами в сплаве обеспечивает стабильность прочности сплава при высоких температурах. Достижение температуры кристаллизации ведет к резкому падению прочности сплава, независимо от условий его получения, в то время как микротвердость H_{μ} при тех же температурах начинает расти, что связано, по нашему мнению, со структурными изменениями сплава в процессе нагрева.

Таким образом, зависимости микротвердости, предела прочности и относительного удлинения разнотолщинных быстрозакаленных лент от температуры $T_{отж}$ изотермического отжига показывают, что существенными факторами для механических характеристик исследуемого сплава являются как сама температура отжига, так и скорость закалки образцов из расплава. Путем разумного увеличения скорости закалки из расплава возможно снижение количества закалочных зародышей в аморфном сплаве, что обеспечивает его повышенную термическую стабильность структуры и прочностные характеристики.

Л и т е р а т у р а

1. Метастабильные и неравновесные сплавы / Ю. В. Ефимов [и др.] ; под ред. Ю. В. Ефимова. – М. : Металлургия, 1988. – 383 с.
2. Судзуки, К. Аморфные металлы / К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото ; под ред. Ц. Масумото ; пер. с япон. – М. : Металлургия, 1987. – 328 с.