

**ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ,
СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В АМОРФНЫХ СПЛАВАХ И
АМОРФНО-НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТАХ**

Пермякова И.Е.,¹ Глезер А.М.^{1,2}

¹ ФГУП "ЦНИИчермет им. И.П. Бардина", г. Москва, Россия, *inga_perm@mail.ru*

² ФГАОУ ВПО НИТУ "МИСИС", г. Москва, Россия, *a.glezer@mail.ru*

Постоянный интерес исследователей к аморфным сплавам (АС), типичным представителям неравновесных систем, обусловлен необычной их структурой и уникальным комплексом свойств, а также возможностью получения из них нанокристаллических материалов. Изучению эволюции свойств и структуры АС от исходного аморфного состояния до частично кристаллического и полностью кристаллического посвящена данная работа.

Существуют условия, при которых кристаллизация аморфного состояния в процессе контролируемого отжига, интенсивной пластической деформации (ИПД) и лазерной обработки будет осуществляться путем образования в аморфной матрице нанокристаллов в течение заданных температурно-временных интервалов и технологических параметров внешних воздействий, что приводит по существу к образованию естественных аморфно-нанокристаллических композитов (АНК). Можно условно выделить два предельных случая формирования аморфно-нанокристаллических композиционных структур. Первый тип: нанокристаллы (объемная доля менее 0,3-0,4), однородно распределенные в аморфной матрице и не контактирующие между собой. Второй тип: нанокристаллы, практически полностью заполняющие весь объем и разделенные тонкими аморфными межкристаллитными прослойками. Между этими предельными структурными состояниями может формироваться большое разнообразие аморфно-нанокристаллических структур, механическое поведение которых мало исследовано. Актуальными и практически неизученными остаются вопросы, связанные с механизмами пластической деформации и разрушения широкого спектра аморфных и аморфно-нанокристаллических материалов, а также закономерностями формирования их механических свойств.

Помимо естественных АНК следует уделить внимание искусственным композитам этого типа. Известно, что применение ИПД является привлекательной технологией для улучшения физико-механических свойств металлических материалов. Формирующиеся при столь больших деформациях структурные состояния весьма необычны и трудно предсказуемы. Изучение процессов ИПД в композитных материалах, состоящих из изначально аморфных составляющих и условий возникновения при этом аморфно-нанокристаллических структур является одним из направлений данной работы.

Лазерное облучение занимает особое место среди современных технологий обработки АС. Этот перспективный метод, имея ряд специфических особенностей, дает дополнительные возможности управления их структурой и свойствами. Кратковременность импульсного лазерного воздействия обеспечивает сохранение тех физических свойств, которые могли бы меняться в течение обычного длительного нагрева благодаря диффузии. Кроме того, этот метод позволяет контролировать процесс формирования нанокристаллов, путем изменения энергии лазерного излучения, длительности импульсов, их частоты. Привлекательным в лазерной обработке является и то, что, задавая закон распределения температур по объему материала, можно получать композиты с необходимым составом структурных единиц и структурных параметров. Следует отметить, что сейчас в научных кругах существует дефицит в исследованиях подобного рода. Таким образом, исходя из вышеизложенного, возникает необходимость в детальном и комплексном изучении физических особенностей лазерного облучения АС с целью создания АНК.

Остановимся на наиболее интересных результатах, полученных при внешних воздействиях на АС:

1) с помощью метода микроиндентирования удалось установить поведение трещиностойкости (K_{Ic}) АС в ранее недоступном для других методов температурном интервале от вязко-хрупкого перехода (в области существования аморфного состояния) до определенных стадий нанокристаллизации. В экспериментах на сплаве $Fe_{58}Ni_{25}B_{17}$ при приближении к температуре отжига 653 К наблюдается значительное увеличение K_{Ic} . Таким образом, в некотором диапазоне температур отжига мы обнаружили эффект пластификации (некоторый рост K_{Ic} при снижении микротвердости HV). Характерный размер наночастиц α -фазы (ОЦК), при котором зафиксирован максимум параметра K_{Ic} , соответствует 110-120 нм при объемной плотности $1,3 \text{ мкм}^{-3}$ кристаллической фазы. Аналогичный, но менее существенный пластифицирующий эффект наблюдается и в сплаве $Co_{70,5}Fe_{0,5}Cr_4Si_7B_{18}$.

2) Подобраны режимы лазерной обработки, позволяющие реализовать различную степень кристаллизации исследуемых АС систем Co-Fe-Cr-Si-B и Fe-Ni-B: тонкие кристаллические слои ($< 1 \text{ мкм}$) на поверхности АС, аморфно-кристаллические композиты ("сэндвичи"), полностью кристаллические сплавы.

3) В процессе лазерного воздействия может происходить смена механизма кристаллизации (например, с первичной на эвтектическую для АС $Co_{70,5}Fe_{0,5}Cr_4Si_7B_{18}$).

4) Изучены особенности микрокартин деформации и разрушения в зоне лазерной обработки АС. Предложена методика определения склонности АС к образованию трещин в условиях локального нагружения и тепловой предыстории, позволяющая в свою очередь оценивать температуру отжига, соответствующую вязко-хрупкому переходу материала и температуры нагрева в зоне термовоздействия сфокусированным лазерным излучением.

5) Проведено комплексное изучение и сравнение характера поведения величины микротвердости по Виккерсу (HV) для АС $Co_{70,5}Fe_{0,5}Cr_4Si_7B_{18}$ при различных видах внешних воздействий. Отмечена немотнотная зависимость HV от параметров воздействий (количества лазерных импульсов, температуры отжига и количества оборотов при ИПД). Первый пик микротвердости в зоне селективного лазерного воздействия хорошо согласуются с данными, полученными при обычном термическом отжиге и при ИПД до 3/4 оборота. Однако следует отметить, что первый максимум HV при лазерной обработке несколько выше, чем при печном отжиге. Этот факт говорит о том, что лазерный нагрев при 100 импульсах (в пределах аморфного состояния сплава) эффективнее способствует упрочнению материала, чем низкотемпературный отжиг, соответствующий температурам 373-423 К. В то же время, он уступает технологии ИПД, при которой микротвердость достигает наибольшей величину 20 ГПа.

6) Получены деформационно-индуцированные композиты из чередующихся слоев АС $Fe_{53,3}Ni_{26,5}B_{20,2}$ и $Co_{28,2}Fe_{38,9}Cr_{15,4}Si_{0,3}B_{17}$ путем их консолидации кручением под высоким давлением в камере Бриджмена. Комплексно исследована последовательность смены структурных состояний композита и его отдельных составляющих при ИПД, а также изменение микротвердости по Виккерсу и магнитных характеристик в зависимости от величины деформации. Установлено, что использование метода кручения под высоким давлением при больших степенях деформации эффективно способствует переводу изученных материалов из аморфного в нанокристаллическое состояние (с размером нанокристаллов 4-20 нм), повышая их микротвердость и сохраняя магнитно-мягкие свойства.

7) Сдерживание процесса начала кристаллизации путем подбора состава АС и режимов их обработки позволяет значительно уменьшить размеры кристаллитов (до 10 нм). После контролируемой термической обработки или ИПД в магнитно-мягком АС можно сформировать нанокристаллическую структуру с требуемыми магнитными

свойствами. Определены два способа обработок АС $\text{Co}_{70,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Cr}_4\text{Si}_7\text{B}_{18}$, при которых в нанокристаллическом состоянии сохраняется высокий уровень как магнитных, так и коррозионных свойств: 1 – вакуумный отжиг в диапазоне температур $T_{an} = 713\text{-}748\text{ K}$ с выдержкой 10 мин; 2 – КВД при двух и трех оборотах подвижной наковальни и давлении 4 ГПа.

8) Выявлены закономерности распространения полос сдвига в АС при кручении под давлением. Обнаружен эффект травления поверхности и декорирования сильнолокализованных полос сдвига, обусловленный сегрегацией атомов металлоидов (бора и кремния для сплава $\text{Co}_{70,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Cr}_4\text{Si}_7\text{B}_{18}$) на неконтактной поверхности ленты, полученной методом спиннингования из расплава.

9) Проанализирована зависимость плотности полос сдвига ρ и их длины L при увеличении температуры отжига для АС. Падение склонности к пластическому течению (критериев ρ и L) начинается при существенно более низких температурах отжига, чем макроскопический вязко-хрупкий переход (для АС $\text{Fe}_{60,8}\text{Co}_{20,2}\text{B}_{14}\text{Si}_{15}$ вблизи 500 K). Полное исчезновение картин пластической деформации происходит лишь при начале процессов активной кристаллизации ($\sim 750\text{ K}$) с поверхности и, распространяющейся вглубь образцов. Собственно отпускная хрупкость наступает тогда, когда снижение плотности и длины полос сдвига находится уже на второй стадии стремительного падения. Эти данные кардинально расходятся с выводами, сделанными Кимурой и Масумото, по мнению которых, способность к формированию полос сдвига не претерпевает сколько-нибудь заметного изменения (снижения) в температурном интервале макроскопического вязко-хрупкого перехода. Таким образом, явление отпускной хрупкости имеет две структурные причины, которые, по-видимому, связаны между собой: снижение склонности к пластическому течению в аморфной матрице и резкий спад сопротивления развитию магистральных квазихрупких трещин.

10) На основании ПЭМ-исследований проведена систематизация наблюдаемых вариантов взаимодействий полос сдвига, распространяющихся в аморфной матрице, с нанокристаллами в АНК: «поглощение», «огибание», «перерезание», «торможение» и «аккомодация». Установлено, что определяющим фактором характера взаимодействия является размер нанокристаллов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-02-00402_a).