

**В. С. Шумихин, А. М. Верховлюк, В. Л. Лахненко,
А. А. Щерецкий, В. В. Апухтин**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

АМОРФНАЯ ФИБРА ИЗ СПЛАВА $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$ ДЛЯ ОБЪЕМНОГО АРМИРОВАНИЯ БЕТОНА

Изготовлена партия аморфной фибры из сплава $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$. Показана высокая коррозионная стойкость фибры в различных агрессивных средах. Установлено повышение физико-механических свойств бетона при армировании аморфной фиброй.

Виготовлено партію аморфної фібри зі сплаву $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$. Показано високу корозійну стійкість фібри в різних агресивних середовищах. Встановлено підвищення фізико-механічних властивостей бетону при армуванні аморфною фіброю.

Initial lot of the amorphous fibre from alloy $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$ has been made. High corrosive resistance of the fibre in different aggressive ambience has been shown. Increasing of physical-mechanical properties of the concrete under reinforcing with amorphous fibre has been established.

Ключевые слова: фибра, армирование, аморфное состояние, прочность, коррозионная стойкость.

Фибра представляет собой волокна, предназначенные для объемного армирования бетона. При производстве фибробетона используют стальные, базальтовые, стеклянные и полимерные волокна.

Сталефибробетон обладает значительными преимуществами по сравнению с неармированным бетоном: большим сопротивлением при сжатии (в 1,25 раза), при осевом растяжении (в 1,65 раза), при изгибе (в 2,5 раза), а также повышенным модулем упругости. Коррозионная стойкость сталефибробетона выше обычных железобетонных конструкций.

Для производства дисперсно-армированного бетона применяются также металлическая аморфная и мелкокристаллическая фибры. Бетон, армированный такими фибрами, обладает повышенными трещиностойкостью, морозостойкостью, коррозионной стойкостью и стойкостью к ударным нагрузкам. Эти показатели у него в 1,5-2,5 раза выше, чем у обычного армированного бетона.

Прочностные характеристики металлической фибры, полученной в аморфном состоянии, выше, чем у обычной стальной. Предел прочности при растяжении для аморфной ленты состава $Fe_{73,3}Cr_{5,4}P_{9,1}C_{10,5}Si_{1,7}$ длиной 28 мм составляет порядка 1500-1700 МПа, для аморфной проволоки аналогичной длины и состава – 2700-3000 МПа [1]. Предел прочности при растяжении для обычной фибры из стальной проволоки составляет 510-850 МПа. Наличие хрома и фосфора в сплавах системы Fe-Cr-C-P увеличивает прочность межатомных связей и уменьшает диффузионную подвижность атомов при повышенных температурах, способствуя получению сплава в аморфном состоянии при затвердевании. Добавки хрома повышают коррозионную стойкость аморфных сплавов на основе железа [2].

Для получения фибры был выбран сплав состава $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$. Для его выплавки использовали следующие материалы: стальные пластины Ст3; феррохром ФХ200 (ГОСТ 4757-91); феррофосфор ФФ14 (ТУ 15 4 72 80); графитовую стружку (ЧМТУ 01-17-75). Компоненты шихты плавил в вакуумной индукционной печи в атмосфере аргона.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для получения фибры. Кусочки сплава загрузались в кварцевую колбу 1 на высоту, равную высоте индуктора 3. Конструкция установки позволяет перемешать колбу с помощью винтового механизма 2, что обеспечивает возможность регулировки зазора H между соплом 8 и закалочным медным барабаном 4. После расплавления с помощью индукционного нагрева жидкий металл выдавливается из сопла под действием давления инертного газа. Струя расплавленного металла попадает на внешнюю поверхность вращающегося медного барабана,

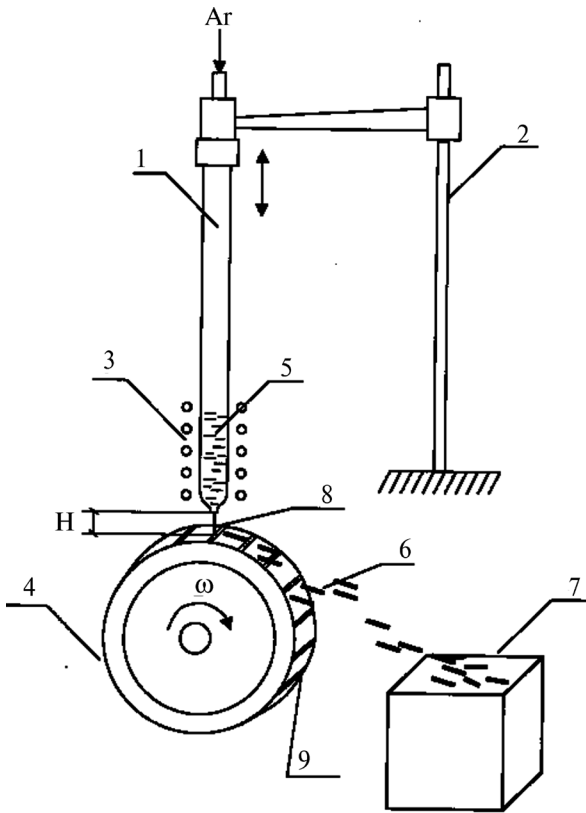


Рис. 1. Технологическая схема получения фибры: 1 – кварцевая колба; 2 – механизм перемещения колбы; 3 – индуктор; 4 – закалочный медный диск; 5 – жидкий металл; 6 – фибра; 7 – приемный контейнер; 8 – сопло; 9 – пазы

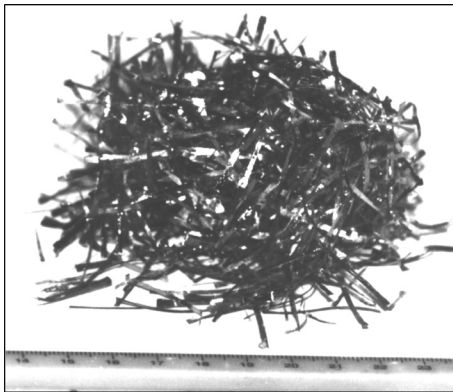


Рис. 2. Внешний вид фибры из сплава $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$

и затвердевшая фибра сбрасывается в приемный контейнер 7 под действием центробежной силы. Длина фибры определяется расстоянием между пазами 9 на внешней поверхности барабана.

Технологический процесс определяется следующими параметрами:

- температурой расплава и его составом;

- скоростью поступления расплава на охлаждающую поверхность, то есть давлением газа в колбе;

- диаметром струи расплава, который определяется размерами отверстия сопла, расстоянием между соплом и поверхностью медного барабана;

- состоянием поверхности медного барабана – температурой, чистотой обработки поверхности диска, расстоянием между пазами на цилиндрической поверхности барабана.

При получении фибры диаметр струи расплава, определяющий ширину фибры, был равен 1,5 мм, давление аргона – 0,05-0,075 МПа. Толщина получаемой фибры находилась в пределах 30-40 мкм, а длина – 25-30 мм (рис. 2). Частота вращения барабана диаметром 240 мм составляла около 3000 мин⁻¹ (скорость вращения можно регулировать в пределах от нуля до 3150 мин⁻¹).

Скорость охлаждения обратно пропорциональна толщине расплава и может быть выражена следующим образом [3]:

$$R = \alpha \frac{(T_1 - T_0)}{C_p \rho \Delta}, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплопроводности, Вт/(м² × К); T_1 – температура расплава, выходящего из сопла, К; T_0 – температура поверхности диска, К; C_p – удельная теплоемкость расплава, Дж/(кг × К); ρ – плотность расплава, кг/м³; Δ – толщина фибры, м.

Сделаем оценочный расчет скорости охлаждения по формуле (1). Считаем, что для получаемой толщины фибры 30-40 мкм коэффициент теплопередачи равен 10⁵-10⁶ (м² · К) [4]. Теплоемкость сплава $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$ в жидком состоянии принимаем равной теплоемкости перлитного чугуна при 1273 К - 670 Дж/(кг · К), согласно ЗД 37.002.0484 86. Плотность сплава фибры при 293 К равна 7200 кг/м³ [5], температура заливки сплава - 1473 К, а температура поверхности медного барабана составляет 298 К. Подставив данные в формулу (1), получим, что скорость охлаждения на поверхности медного барабана равна 8,4 × 10⁵ – 8,4 × 10⁶ К/с. Порядок вычисленных скоростей охлаждения подтверждается данными [6],

где лента толщиной 30 мкм из сплава $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$ затвердевала со скоростью 10^7 К/с.

Образцы фибры исследовали методами дифференциально-термического анализа на установке SETARAM (рис. 3) и рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-3М в монохромном K_{α} -Fe излучении (рис. 4). Согласно данным ДТА и рентгеноструктурного анализа, образцы фибры содержали аморфную фазу. При нагревании образцов на ДТА-кривой имеется пик, соответствующий температуре 745 К, который указывает на кристаллизацию аморфной фазы образца (рис. 4). На дифракционной кривой рентгеновского анализа видно, что образцы являются аморфно-кристаллическими, дифракционная кривая отражает наличие аморфной и кристаллической фаз (рис. 4).

Коррозионную стойкость фибры определяли при температуре 297 К в различных средах: в дистиллированной воде, щелочной среде (pH = 8,0-9,0) – растворе цемента в воде, в одонормальном водном растворе HCl и 10 %-ном водном растворе $FeCl_3$. Коррозионную стойкость оценивали количественно по потере массы фибры и качественно - по наличию или отсутствию реакции. Одновременно с фиброй испытывали кусочки проволоки из стали марки Ст3 диаметром 1 мм и длиной 25-30 мм. Такой материал используется при производстве сталефибробетона. Результаты коррозионных испытаний (таблица) показывают, что фибра из сплава $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$ устойчива к воздействию указанных сред. В процессе выдержки поверхность фибры в каждой из них оставалась блестящей без признаков коррозии.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными работ [7, 8], демонстрирующими повышение коррозионной стойкости сплавов $Fe_{80-x}Cr_xP_{13}C_7$ с увеличением содержания хрома. При массовой доле хрома 8-10 % сплав практически не корродирует. Авторы работы [9] также утверждают, что сплав $Fe_{72}Cr_8P_{13}C_7$ имеет высокую коррозионную

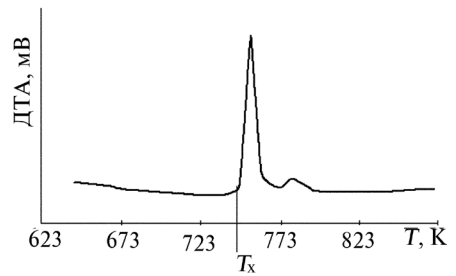


Рис. 3. ДТА фибры из сплава $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$ при нагревании со скоростью 10 К/мин



Рис. 4. Рентгенограмма фибры из сплава $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$, отражающая наличие аморфной (А) и кристаллической (K_1, K_2, K_3) фаз

Коррозионная стойкость фибры из сплава $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$ и проволоки из стали марки Ст3 в различных средах при 297 К

Среда	Время выдержки, ч	Коррозия различных материалов, %			
		проволока, сталь марки Ст3		фибра $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$	
		потеря массы, %	признаки реакции	потеря массы, %	признаки реакции
Дистиллированная вода	250	0,98	поверхность покрыта ржавчиной	0	не обнаружены
Раствор цемента в воде	250	0,85	на поверхности черные пятна	0	-"-
Одонормальный раствор HCl	24	11,6	идет реакция, выделяется водород	0	-"-
10 %-ный раствор $FeCl_3$	24	20,4	поверхность покрыта ржавчиной	0	-"-

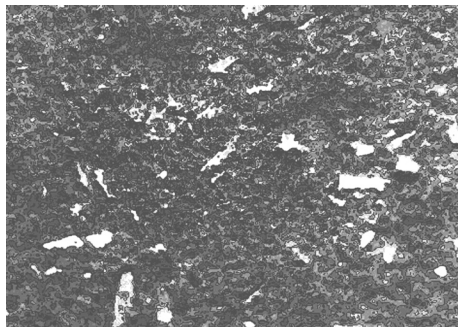


Рис. 5. Бетон, армированный фиброй из сплава $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$

стойкость, а дополнительное легирование никелем в количестве 5 % атомной доли увеличивает стойкость в различных средах за счет образования пассивной пленки.

Исследовали физико-механические свойства образцов фибробетона, полученного из следующих компонентов: кварцевый песок и цемент марки М400 в соотношении 3:1, фибра в количестве 3,5 % массовой доли. Структура фибробетона представлена на рис. 5. Для сравнения были сделаны также образцы и без фибры. Время выдержки образцов составляло 14 суток. Испытания проводились на универсальной

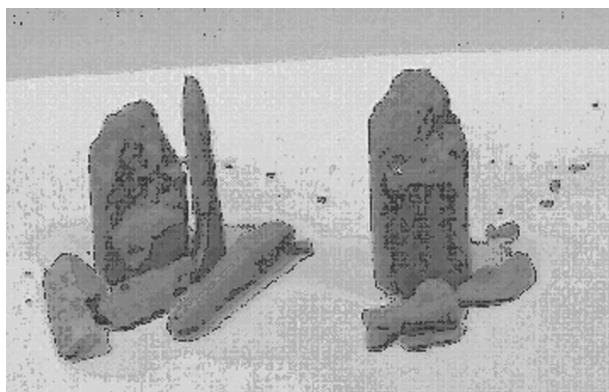


Рис. 6. Характер разрушения образцов: *а* – из бетона; *б* – из фибробетона

машине по стандартной методике. Характер разрушения образцов после испытаний на сжатие показан на рис. 6. Образец бетона без фибры разрушался по всей высоте от верха до основания на большие вертикально ориентированные элементы, а образец с фиброй – в верхней части при большей нагрузке с образованием небольших обломков. Испытания показали, что прочность на сжатие образцов фибробетона в 1,2-1,3 раза больше, чем образцов без фибры, а прочность при изгибе больше на 10 %.

Несмотря на наличие в фибре микросталлической фазы (кроме аморфной), фибра имеет высокую коррозионную стойкость и заметно повышает прочность бетона при армировании. Таким образом, сплав $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$ является технологичным и перспективным для производства фибры, используемой при получении фибробетона, прежде всего, вследствие высокой коррозионной стойкости.



Список литературы

1. De Guillebon B., Henry M., Le Gal G., C. Tete. Mechanical and magnetic properties of amorphous Fe-Cr-P-C ribbons and wire // Materials Science and Engineering. – 1988. – № 98. – P. 539-542.
2. Хасимото К. Коррозия аморфных материалов // Киндзоку. – 1980. – Т. 50, № 4. – С. 42-47.
3. Naka M., Inoue A., Masumoto T. // Sci. Rep. RITU A 29. – 1981. – № 184. – P. 234-236.
4. Jones H. // Rep. Progr. Phys. – 1973. – Vol. 36. – P. 1425.
5. Boucheret J.-M. Concretes and mortars reinforced with fibraflex metallic amorphous fibres // Workshop on fibre reinforced cement and concrete / University of Sheffield. – 1994. – № 7.
6. Новохатский И. А., Усатюк И. И. О стабилизации свойств металлических стекол, получаемых из жидкого состояния сверхбыстрой закалкой // Металлы. – 1998. – № 5. – С. 100-105.
7. Masumoto T., Hashimoto K., Naka M. Proc. the 3-rd Int. Conf. On Rapidly Quenched Metals. London: Society The Metals. – 1978. – Vol. 2. – P. 435.
8. Naka, Hashimoto K., M. Inoue A., Masumoto T. J. Non-Crystalline Solids 31. – 1979. – № 347.
9. Исаев Н. И., Васильев В. Ю., Шумилов В. Н. Структура аморфных металлических сплавов: Тез. докл. – М.: МИСиС, 1980. – С. 77-80.

Поступила 04.09.2008