

УДК 669.158.81

## О ПОЛУЧЕНИИ, СВОЙСТВАХ И ПРИМЕНЕНИИ БЫСТРООХЛАЖДЕННЫХ ВОЛОКОН

© 2013 г. **В. Н. Анциферов, М. М. Серов, В. П. Лежнин, А. А. Сметкин**

Научный центр порошкового материаловедения Пермского национального исследовательского политехнического университета (НЦ ПМ ПНИПУ), г. Пермь

Российский государственный технологический университет имени К. Э. Циолковского» (РГТУ–МАТИ), г. Москва

**В. Н. Анциферов** – докт. техн. наук, проф., акад. РАН, науч. рук-ль НЦ ПМ ПНИПУ, зав. кафедрой порошкового материаловедения ПНИПУ (614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 6). Тел.: (342) 239-11-19. Факс: (342) 239-11-22. E-mail: director@pm.pstu.ac.ru, patent@pm.pstu.ac.ru.

**М. М. Серов** – докт. техн. наук, профессор кафедры порошковых композиционных материалов и покрытий РГТУ–МАТИ (121552, г. Москва, ул. Оршанская, 3). E-mail: serovrmf@yandex.ru.

**В. П. Лежнин** – аспирант той же кафедры РГТУ–МАТИ. E-mail: valek1945@rambler.ru.

**А. А. Сметкин** – канд. техн. наук, доцент кафедры порошкового материаловедения ПНИПУ. Тел.: (342) 239-11-99. E-mail: solid@pm.pstu.ac.ru.

Методом экстракции висящей капли из расплава получены волокна металлов, сплавов и интерметаллидов с микрокристаллической и аморфной структурой при скоростях охлаждения расплава до  $10^6$  К/с. Показаны условия формирования быстроохлажденных металлов и сплавов, обладающих высоким комплексом физико-механических характеристик. Предложена технологическая схема изготовления пористоволокновых металлических материалов (ПВММ), предназначенных для фильтрации агрессивных сред и шумогашения конструкций горячего тракта газотурбинных двигателей. При испытаниях на шумогашение ПВММ получен эффективный коэффициент звукопоглощения не ниже 0,8 в диапазоне частот 80–10 000 Гц при уровне звукового давления 110–150 дБ.

**Ключевые слова:** капля расплава, экстракция, быстроохлажденные волокна, пористоволокнистые материалы, свойства.

Fibers of metals, alloys, and intermetallic compounds with microcrystalline and amorphous structure at melt cooling speeds up to  $10^6$  K/s have been produced by the method of suspended drop extraction from melt. The conditions of quick-cooled metal and alloy formation possessing a high complex of mechanical and physical characteristics are shown. The process diagram of manufacture of porous-fibrous metal materials designed for aggressive medium filtration and noise suppression in the hot channel designs of gas-turbine engines is proposed. In testing the noise suppression of porous-fibrous metal materials, the effective factor of sound absorption no below than 0.8 is obtained in a range of frequencies of 80–10 000 Hz at the sound pressure level of 110–150 dB.

**Key words:** melt drop, extraction, quick-cooled fibers, porous-fibrous materials, properties.

В настоящее время актуальной является задача создания материалов со специальными свойствами. В частности, особый интерес представляют технологии получения быстроохлажденных сплавов с микро-, нанодисперсной и аморфной структурой, поскольку они обладают таким комплексом повышенных физико-механических, магнитных, химических свойств, который невозможно получить в обычных сплавах. Однако применение быстроохлажденных материалов ограничено тем, что их получение возможно только в высокодисперсном состоянии – в виде порошка, тонких волокон и лент с характерным размером в поперечном сечении 20–80 мкм. Малые размеры обусловлены необходимостью быстрого теплоотвода от расплавленного металла с обеспечением скорости охлаждения на уровне  $10^5$ – $10^6$  К/с. В этом случае возможно достижение высокой степени переохлаждения расплава до температуры, равной половине температуры плавления.

Цель данной работы – получение волокон и пористоволокновых металлических материалов (ПВММ), предназначенных для фильтрации агрессивных сред

и шумогашения в конструкциях горячего тракта газотурбинных двигателей, и изучение их свойств.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Одним из способов получения метастабильных материалов является метод экстракции висящей капли из расплава (ЭВКР) вращающимся диском (теплоприемником) [1], который играет роль устройства для кристаллизации и извлечения материала. Особенность данного метода заключается в том, что расплавленный металл находится в свободном состоянии и образует висящую каплю на торце стержня. С каплей контактирует вершина заточенной рабочей кромки вращающегося охлажденного диска-теплоприемника. В зоне контакта происходит затвердевание расплава. Вследствие вращения теплоприемника материал выносятся из расплава в виде волокна и под действием центробежных сил сбрасывается с вершины рабочей кромки.

Метод ЭВКР привлекателен для получения волокон в силу следующих возможностей:

- достижение сверхвысоких скоростей охлаждения (до  $10^6$  К/с);
- значительный диапазон толщин получаемой продукции (от 20–30 мкм до 1,5–2,0 мм);
- разнообразие геометрических форм (порошки, частицы игольчатой, пластинчатой или чешуйчатой форм, непрерывные или мерные волокна, ленты);
- получение тугоплавких и химически активных материалов и сплавов на их основе;
- высокая производительность метода.

На величину эквивалентного диаметра получаемой продукции и стабильность процесса изготовления волокна влияют соотношение количества расплава, подаваемого в зону затвердевания ( $m_p$ ), и количества отводимого материала ( $m_b$ ) в виде волокна, затвердевшего на рабочей кромке теплоприемника, а также скорость вращения теплоприемника. Однако, чтобы обеспечить стабильные условия получения волокна заданного размера, величины  $m_p$  и  $m_b$  должны быть согласованы между собой и с потоком тепла, излучаемого нагревателем. Если  $m_p = m_b$ , то возможно получение непрерывного волокна, если  $m_p < m_b$  – будет получено дискретное волокно.

Если мощности, выделяемой нагревателем, достаточно, чтобы расплавить материал, подаваемый в зону нагрева, и выполняется условие  $m_p = m_b$ , то образуется устойчивая капля расплава. Если в ходе процесса мощность нагревателя уменьшить, то капля затвердеет, а если увеличить, при постоянной скорости подачи расплава, – капля начнет пульсировать. Сначала образуется большая капля, которая опускается вниз, и если она не успевает коснуться теплоприемника, то отрывается от прутка. Если капля касается теплоприемника до отрыва, то в зоне ее контакта с рабочей кромкой начинается процесс экстракции волокна, объем капли уменьшается и под действием сил поверхностного натяжения она подтягивается вверх к прутку. Процесс получения волокна прерывается, капля опять начинает увеличиваться в объеме, и цикл повторяется.

Величину  $m_p/m_b$  можно рассматривать как коэффициент нагрузки теплоприемника. При  $m_p/m_b = 1$  процесс затвердевания расплава на диске происходит непрерывно, а уменьшение этого соотношения свидетельствует о получении дискретных волокон и неэффективном ведении процесса.

В отличие от волокон, полученных резанием или волочением, поверхность волокон в случае использования метода ЭВКР формируется в неодинаковых условиях. Можно выделить поверхность, кон-

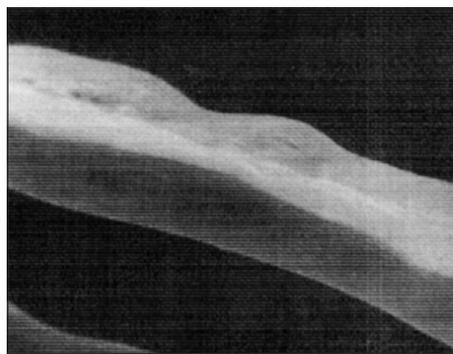


Рис. 1. Вид волокна сплава X23Ю5Т (×500)

тактирующую с теплоприемником, и поверхность, контактирующую с расплавом. Контактная поверхность волокна отражает состояние теплоприемника. Наружная поверхность представляет собой поверхность затвердевания расплава. Повышение скорости роста твердой фазы в момент декантации расплава и возрастание скорости ее перемещения относительно расплава приводят к формированию гладкой поверхности волокна. При снижении скорости затвердевания происходит увеличение шероховатости волокна (рис. 1).

Поверхностные изменения могут быть уменьшены, если контролировать причины их возникновения. Таковыми могут быть вибрация капли, ее геометрия и тепловые потоки. Так, анализ появления волнообразных изменений поперечного сечения металлических волокон, полученных методом ЭВКР, показал, что они вызваны волнами Релея на поверхности капли расплава [2].

Полученные расчетные результаты сравнивались с экспериментальными данными для волокон железа и сплава X23Ю5Т [2, 3]. Изменения диаметра и обрыв волокна обусловлены капиллярными волнами на поверхности капли расплава (волны Релея). Волны на поверхности волокна появляются от действия вибраций с частотами, в 3000–3500 раз превосходящими частоты вращения теплоприемника, или вследствие дефектов, расположенных на поверхности волокна на расстоянии  $\sim 0,2 \pm 0,3$  мм друг от друга. При определении зависимости длин волокон от поверхностного натяжения, вызванной волнами Релея на поверхности капли (при фиксированной плотности расплава), установлено, что длина волокна уменьшается с увеличением поверхностного натяжения, а также с повышением номера действующей гармоники. При анализе зависимости длин волокон и волнообразных изменений диаметра волокна от плотности расплава металла показано, что с увеличением последней длина волокна возрастает.

Конвекция вызвана существенным температурным градиентом в вязком сдвиговом слое расплава на поверхности затвердевающего волокна. Согласно проведенным оценкам капиллярное движение идет со скоростью порядка десятых долей миллиметра за секунду (расчеты проводились для титана). С помощью аналитического решения установлены количественные зависимости скорости охлаждения и скорости продвижения границы раздела фаз от коэффициента теплопередачи, характеризующего тепловой контакт между затвердевающим волокном и вращающимся теплоприемником. Экспериментально показано, что вязкий слой расплава на поверхности волокна может иметь дискретный характер, как это видно на примере волокна алюминид титана (рис. 2).

Быстроохлажденные волокна, с точки зрения практического применения, в настоящее время востребованы высокотехнологичными производствами различных отраслей промышленности, в том числе аэрокосмическим комплексом, металлические волокна перспективны для создания проницаемых нетканых материалов – войлоков. Разработана технология получения функциональных материалов на основе быстроохлажденных волокон.

Предложена технологическая схема изготовления пористоволокновых металлических материалов, предназначенных для фильтрации агрессивных сред и шумогашения [4, 5].

Для формирования ПВММ из волокон использовали метод расчеса и иглопробивной обработки волокновой массы, обеспечивающий более высокие механические свойства материала и производительность процесса войлокования. Изготовление ПВММ состоит из следующих основных этапов:

– получение предварительного войлока, представляющего собой высокопористый (до 98 %) слой войлока с равномерным распределением плотности по объему;

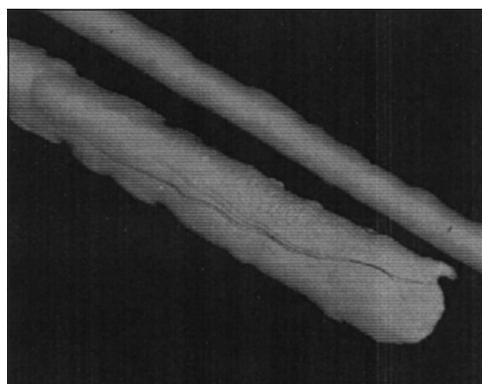


Рис. 2. Вид волокна алюминид титана (×900)

– уплотнение высокопористого войлока до заданных параметров путем прессования и спекания в вакууме с последующей механической обработкой и калибровкой под геометрические размеры.

Предварительный расчес – операция, выполняемая для подготовки волокна к расчесу. Расчес – одна из основных стадий технологического процесса формирования холста из металлических волокон. Расчес осуществляется один или более раз с целью выравнивания плотности как по ширине, так и по длине холста. Необходимо учитывать тот факт, что при проведении этой операции волокно претерпевает большое механическое воздействие, обуславливающее его разрушение и образование «сечки», т. е. короткомерных волокон (до 10 мм длиной) и даже частиц, длина которых не превышает 1 мм.

Укладка – операция, позволяющая получать полуфабрикаты холста из волокновой массы требуемых ширины, длины и толщины.

Для изготовления холстов и устранения потерь волокна при расчесывании разработано устройство, позволяющее в процессе получения волокон методом ЭВКР формировать холсты заданной плотности с высокой однородностью.

Суть метода формирования холста заключается в формировании пористого материала на перемещаемой относительно зоны падения волокна подложке в процессе получения волокна методом ЭВКР диском-теплоприемником. Плотность и пористость получаемого материала зависят от скорости экстракции волокна и длины пролета волокна до подложки. Текстура ПВММ определяется направлением и скоростью перемещения подложки относительно зоны контакта волокна с подложкой, а также длиной волокна.

Иглопробивная обработка позволяет осуществлять соединение одного холста с другим, тем самым увеличивать толщину конечного проницаемого листа, послойно изменяя его плотность, а также выпускать материал, состоящий из пористых слоев различных металлов.

Накатка – операция, обеспечивающая намотку холста и его хранение перед выполнением последующих обработок в рулоне.

Прокатка проводится для придания материалу (холсту) требуемых параметров поровой структуры. Этот технологический прием можно осуществлять после того, как в волокнистую массу будет введен порошок, или параллельно с насыпкой на одну из сторон холста порошка различных фракций, начиная с крупной и заканчивая самой мелкой

(при необходимости создания материалов с переменными, изменяющимися по толщине холста пористостью и размерами пор). Прокатка может выполняться как с подкладками (сетками, перфорированными, компактными и гофрированными листами), так и без них.

Спекание проводится для придания пористому материалу необходимого комплекса физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик и может быть осуществлено по нескольким вариантам: вакуумное; электроискровое; электроимпульсное; горячее изостатическое прессование; спекание в защитной среде. Выбор способа спекания, параметров процесса и оборудования для его реализации определяется комплексом требований, предъявляемых к конечному продукту.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Представленная технология ЭВКР применима для получения широкого спектра быстроохлажденных материалов в виде порошка или волокна.

Для формирования волокнистых панелей требуемой пористости (85, 90 и 95 %) необходимо спекание готовых войлоков. Установлена зависимость влияния процессов войлокования с последующим спеканием на прочностные характеристики на примере волокон сплава Х20Н80 ВИ. Исследование прочности волокон при растяжении показало, что спекание разупрочняет волокно и снижает предел прочности.

Вакуумный отжиг волокнового материала при температурах от 400 до 700 °С в течение 1 ч за счет снижения наклепа волокна позволил повысить пресуемость войлока. Так, если при уплотнении волокнового образца при давлении прессования 400 МПа плотность неотожженного войлока составляет 10 %, то при прессовании с этим же давлением отожженного образца плотность его увеличивается от 15 до 30 % при повышении температуры термообработки. При этом среднее межволоконное расстояние составило 200–250 мкм.

Жаростойкость металлических войлоков анализировали по зависимости приращения массы от продолжительности выдержки при 800 °С на воздухе на образцах с относительной пористостью 85 %. Исследования показали, что полученный металлический войлок удовлетворяет требованиям по жаростойкости для нихрома Х20Н80. Увеличение пористости волокновых материалов из

нихрома с 80 до 95 % приводит к снижению теплопроводности волокон в 1,2–1,3 раза. Полученные ПВММ могут успешно применяться как в фильтрующих устройствах, так и в качестве элементов звукопоглощающих конструкций горячего тракта газотурбинных двигателей. При испытаниях на шумогашение ПВММ показали эффективный коэффициент звукопоглощения не ниже 0,8 в диапазоне частот 80–10 000 Гц при уровне звукового давления 110–150 дБ.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что при получении металлических волокон методом ЭВКР количество расплава, подаваемого в зону затвердевания, и количество отводимого материала в виде волокна, затвердевшего на рабочей кромке теплоприемника, должны быть согласованы между собой и с потоком тепла, излучаемого нагревателем. Повышение скорости роста твердой фазы в момент декантации расплава и увеличение скорости ее перемещения относительно расплава приводят к формированию гладкой поверхности волокна.

2. Разработана технология создания пористоволокновых металлических материалов путем предварительного получения войлока для последующего изготовления холста. Спекание осуществлялось посредством вакуумного отжига для придания пористому материалу необходимого комплекса физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик.

3. При испытаниях на шумогашение ПВММ показали эффективный коэффициент звукопоглощения не ниже 0,8 в диапазоне частот 80–10 000 Гц при уровне звукового давления 110–150 дБ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Быстрозакаленные металлические сплавы / Под ред. С. Штиба, Г. Варлимонта. М.: Металлургия, 1989.
2. Анциферов В. Н., Трусов П. В., Няшина Н. Д., Сметкин А. А. // Изв. вузов. Цв. металлургия. 2007. № 3. С. 57.
3. Борисов Б. В., Серов М. М. // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2011. № 4. С. 36.
4. Анциферов В. Н., Сметкин А. А. // Свойства и перспективы применения металлических пористоволокнистых материалов: Сб. тр. XXVII Росс. школы по проблемам науки и технологий (Миасс, 26–28 июня 2007 г.). Екатеринбург: УрО РАН, 2007. С.124.
5. Сметкин А. А., Хайдаршин А. Ф., Бирюков Ю. А. // Конструкции из композ. материалов. 2006. № 4. С. 209.