**Слайд 2**

Одним из перспективных материалов, позволяющих обеспечить в приборостроении решение вопросов, связанных с миниатюризацией, повышением точности и стабильности, расширением диапазона допустимых климатических и механических воздействий, является микропровод в стеклянной изоляции.

Сверхмалый диаметр микропровода— до 1 мкм — обеспечивает существенное снижение массы и габаритов элементов из микропровода, уменьшает их механическую, тепловую и электрическую инерционность. Сплошная стеклянная изоляция предохраняет материал жилы от внешних воздействий и является предпосылкой для длительной стабильности, высокой надежности и точности элементов из микропровода, этому способствует также литая структура материала жилы. Высокая механическая прочность микропровода является залогом его технологичности в условиях промышленного производства, а относительно невысокая стоимость делает элементы из микропровода экономичными.

Впервые тонкие металлические нити в стеклянной изоляции (из жидкой фазы металлов) были получены в 1924 г. Тейлором. Метод получения микропровода усовершенствовал в 1940 г. Маковский. Сущность способа заключается в нагреве навески металла в горизонтально расположенной стеклянной трубке газовой горелкой до размягчения трубки и плавления металла с последующим быстрым растягиванием трубки. Метод не получил достаточно широкого распространения из-за ограниченной длины микропровода и неконтролируемости его параметров.

Новый способ получения литых микропроводов был предложен в 1948 году проф. Улитовским. Он позволял получать достаточно длинные отрезки микропровода.

Первые работы по исследованию процесса литья микропровода и его свойств проводились в 50-х годах под руководством Улитовского.

В настоящее время разработки в области микропроводов стали снова востребованы.

**Слайд 3**

Микропровода успешно применяют в сферах электротехники, микроэлектроники и торговли.

Из них изготавливают:

Метки систем защиты от подделок, ценных бумаг и систем против воровства;

Радиоэкранирующие и радиопоглощающие покрытия и материалы

Композиционные материалы чувствительные к механическим напряжениям и магнитному полю;

Прецизионные высокоомные резистивные элементы, резисторы, делители напряжения;

Миниатюрные катушки индуктивности, трансформаторы, дроссели;

Термо- и тензорезисторы, термометры сопротивления, элементы катализаторов;

Микропроволочные точечные электроды из благородных металлов (золото, платина) для медицинских и биологических применений.

Сенсоры взрывоопасных газов, магнитного поля.

На рис. – Радиоэкранирующая хлопчатобумажная ткань (слева) и радиопоглощающий маскировочный комплект (справа)

Также немаловажным считаю их применение в создании метаматериалов.

**Слайд 4**

Метаматериал — это композиционный материал, свойства которого обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой. Они представляют собой искусственно сформированные и особым образом структурированные среды, обладающие электромагнитными или акустическими свойствами, сложнодостижимыми технологически, либо не встречающимися в природе.

например, отрицательные по величине значения как диэлектрической ε, так и магнитной μ проницаемостей, ~~пространственную структуризацию (локализацию) распределения величин этих параметров (в частности, периодическое изменение коэффициента преломления как у фотонных кристаллов~~), наличие возможности управления параметрами среды в результате внешних воздействий и т. д.

На рис. –

**Слайд 5**

Как говорилось ранее, способ Тейлора не получил распространения из-за низкой технологичности.

Сущность процесса формирования микропровода способом Улитовского следующая - навеска металла в несколько грамм помещается в стеклянную трубку с опаяным донцом и вместе с последней вводится в индуктор высокочастотной установки.

Под действием магнитного поля индуктора навеска металла плавится и размягчает примыкающие к ней стенки стеклянной трубки. Кроме расплавления металла магнитное поле индуктора обеспечивает поддержание металла в средней части индуктора во взвешенном состоянии в виде микрованны. В дальнейшем, путем прикосновения к донцу микрованны стеклянным штабиком, часть ее оболочки оттягивается на специальное приемное устройство в виде стеклянного капилляра со сплошным металлическим заполнением в виде непрерывной токопроводящей жилы. На пути от микрованны до приемного устройства микропровод проходит через кристаллизатор в виде струи охлаждающего агента.

В других случаях, в зависимости от свойств используемого металла и размеров получаемого микропровода, уровень металла в микрованне непрерывно восстанавливается вводимым в нее стержнем шихтового металла.

Специально для получения микропровода из высокопрочных сплавов был разработан комбинированный метод литья. В нём помимо основной микрованны формируется дополнительная. Когда в основной капле остается примерно 40% от объема, она пополняется каплей из дополнительной. Это нужно из-за специфики литья микропроводов. Для некоторых сплавов выход капли «на режим», когда в ней протекли все нужные для устойчивого литья процессы, может занимать до 40 минут, что не позволяет получить микропровод большой длины.

* Диаметр металлической жилы 1-60 мкм с толщиной изоляции 1-20 мкм.
* Возможность получения микропровода практически из всех металлов и сплавов (Cu, Au, Ag, Co, Ni, Sn, Pb, Sb и т.д.).
* Непрерывные отрезки до нескольких км.
* Благодаря скорости охлаждения до 106 град/сек возможность формировать нанокристаллические, микрокристаллические или аморфные структуры, тем самым получая уникальные физико-механические свойства.

**Слайд 6**

Известно, что прочность промышленных сплавов составляет всего 20-30% теоретической; основная причина этому - дефекты кристаллической решетки. Высокоскоростная закалка расплава и получение ультрадисперсных, аморфных или нанокристаллических структур позволяет в значительной степени повысить механические свойства металлических материалов.

При поиске сплава для получения микропровода с высокими показателями прочности предполагалось, что удастся повысить уровень прочности некоторых известных высокопрочных сплавов за счет специфических условий литья микропроводов и их структуры. Практика литья микропроводов показывает, что использовать сплавы с содержанием легирующих элементов высокой химической активности в сумме более 5% не представляется возможным из-за интенсивного в условиях литья окислительно-восстановительного процесса ~~в системе металл - стекло~~.

Поэтому предварительно были опробованы сплавы, представляющие собой твердые растворы на основе системы CoNi (элгилой), дисперсионно-твердеющий сплав (условное название «Проволока А») и мартенситно-стареющий сплав в системе Fe-Ni-Mo-Co (см. таблицу).

Характеристики полученных из этих сплавов микропроводов показаны в таблице. Из представленных данных видно, что достигнуть эффекта упрочнения для микропроводов по сравнению с исходным пластически деформированным состоянием не удается. Наоборот, уровень прочности существенно снижается, вероятно, из-за того, что смачиваемость между расплавом металла и размягченным стеклом в процессе литья была низкая и необходимого диффузионного слоя в системе металл - стекло не образовалось. Процесс литья протекал неустойчиво, с большим разбросом по диаметру микропровода и образованием трещин и сколов в стеклоизоляции. При этом не удалось получить микропровод длиной более 50 м. Это потребовало разработки нового состава сплава с учетом особенностей физикохимического взаимодействия в системе металл - стекло и технологических особенностей литья микропроводов.

При создании сплава за основу был взят метод упрочнения матричного твердого раствора за счет легирования элементами, образующими в сплаве наноразмерные интерметаллидные фазы. Разработка оптимального состава сплава проводилась в системе Ni-Cr-Mo, в которой наряду с твердыми растворами на основе никеля и молибдена образуются интерметаллические фазы, такие как δ-фаза (Ni-Мо), σ-фаза, P-фаза (Crl8-Mo42-Ni40) и др. Поля этих фаз, согласно изотермическому разрезу системы при 1250°С, граничат с промежуточными областями, являющимися переходными зонами между твердым раствором и фазами, которые могут состоять из двух или трех составляющих (фаз) (рис. 4.1).

Образование подобных фаз и присутствие их в сплавах, закаленных при обычных скоростях охлаждения, отрицательно сказывается на механических характеристиках сплавов, так как они весьма хрупки и, начиная с определенных размеров выделений (обычно 3-5 мкм), приводят к снижению вязкости материала. Очевидно, интенсивное перемешивание «капли» в поле высокочастотного индуктора и последующая высокоскоростная закалка расплава при литье микропроводов приводят к мелкодисперсному выделению фаз и равномерному их распределению по объему металлической жилы.

**Слайд 7**

Было изготовлено четыре серии никелевых сплавов с различным содержанием хрома и молибдена:

Результаты исследований приведены на рис. 4.3. Видно, что прочность микропроводов увеличивается по мере повышения степени легирования никеля хромом и молибденом и достигает наибольших значений (4000 МПа) при содержании хрома 20-40% и молибдена 30-35%.

Рентгеноструктурный анализ микропроводов из опытных сплавов, показал начало выделения дисперсных фаз из пересыщенного твердого раствора при высоком содержании в сплаве хрома и молибдена.

Металлографический анализ показал, что в сплавах, содержащих 25%Мо, имеются эвтектические включения, наличие которых, вероятно, приводит к снижению уровня прочности микропроводов.

С помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра было установлено, что жила микропровода представляет собой твердые растворы на основе никеля с увеличенным параметром решетки за счет растворения в них хрома и молибдена.

**Слайд 8**

В сплавах серии 1 период решетки твердого раствора составляет 3,59 Å. Период ГЦК-решетки чистого никеля равен 3,5169 Å. В сплавах серий 2 и 4 обнаружена фаза, структурно и по составу близкая к P-фазе. Количество этой фазы в сплавах увеличивается по мере повышения содержания в твердом растворе хрома и молибдена.

**Слайд 9**

Наилучших результатов удалось добиться при введении бора и кремния в сплав никеля с 20% хрома и 35% молибдена.

С учетом окислительно-восстановительных процессов, происходящих в системе сплав - боросиликатное стекло, для улучшения технологичности сплавов и увеличения длины микропроводов в сплавы выбранных тройных составов вводили до 3% кремния и до 0,3% бора. Это положительно сказалось на технологичности процесса и свойствах литых микропроводов.

Также для повышения чистоты исходных сплавов и уменьшения разброса прочности по длине микропроводов было проведено дополнительное легирование сплава выбранного состава раскисляющими и рафинирующими добавками.

Сверхвысокопрочное состояние не поддается описанию стандартной дислокационной теорией. Существует несколько теорий такого сильного упрочнения микропроводов: одной из причин может быть высокая степень дислокаций, в том числе винтовых, которые тормозят процессы возникновения и развития разрушающих трещин. По другой теории – за счет пересыщения расплава образуются неравновесные структуры и появляются внутренние остаточные сжимаемые напряжения. Для разрушения требуется преодолеть, дополнительно, сжимающие напряжения. Ещё одна теория предполагает воздействие масштабного эффекта – чем тоньше двумерная структура, тем она прочнее по малому наличию дефектов.

Опробование разработанных высокопрочных микропроводов для армирования полимерных композиций показало, что прочность удается повысить в 1,8-2,0 раза. Кроме того, такие микропровода оказались весьма перспективными с точки зрения повышения прочности при бифилярном методе получения магнитных ткацких экранов из магнитомягких литых микропроводов в стеклянной изоляции, в системах защиты технических средств и биологических объектов.