

«ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ »

Лабораторный практикум

СОДЕРЖАНИЕ

№	Тема лабораторного/практического занятия	Стр.
1.	Микроструктура износостойких легированных сталей и чугунов	2
2.	Микроструктура антифрикционных цветных сплавов	14
3.	Расчет композиционного металлополимерного покрытия для самосмазывающихся подшипников скольжения: освоение методики расчета ...	26
4.	Расчет композиционного металлополимерного покрытия для самосмазывающихся подшипников скольжения: выполнение самостоятельного расчета по индивидуальным заданиям	26
5.	Технологический процесс получения износостойких ионно-плазменных покрытий (при магнетронном испарении)	32
6.	Микроструктура и свойства ионно-плазменных металлических и композиционных износостойких покрытий	39
7.	Определение прочности электрометаллизационных покрытий на плоских и цилиндрических образцах	45
8.	Нанесение гальванических покрытий на металлические материалы	52

Лабораторная работа № 1

МИКРОСТРУКТУРА ИЗНОСОСТОЙКИХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: сопоставление микроструктуры легированных сталей и чугунов; выявление структурных особенностей, способствующих их высокой износостойкости.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Легированной называется сталь, содержащая специально введенные элементы для получения требуемых свойств или имеющая повышенное содержание постоянных, технологически неизбежных примесей.

Наиболее распространенными легирующими элементами являются хром, марганец, никель, кремний, вольфрам, ванадий, молибден, титан и другие. Поскольку при выплавке в сталь обычно вводятся кремний и марганец для раскисления и связывания серы, то легированной является сталь при их содержании соответственно $>0,9$ и $0,8\%$,

Легирующие элементы, растворяясь в железе, изменяют положение критических точек, расширяя или сужая область феррита и аустенита, поэтому пользоваться диаграммой состояния железо-цементит при анализе структур легированных сталей в ряде случаев совершенно недопустимо.

По отношению к углероду легирующие элементы делятся на две группы - некарбидообразующие: никель, кремний, алюминий, медь, кобальт; - карбидообразующие: титан, ванадий, вольфрам, молибден, хром, марганец и другие (элементы перечислены в порядке уменьшения устойчивости их карбидов к растворению в аустените при нагреве).

Некарбидообразующие элементы растворяются в феррите и аустените, тогда как карбидообразующие взаимодействуют с углеродом, и в зависимости от их количества и концентрации способны растворяться в феррите, аустените, цементите или образовывать специальные карбиды.

Легирующие элементы обозначаются следующими буквами: С - кремний, Г - марганец, Х - хром, Н - никель, М - молибден, В - вольфрам, Ф - ванадий, Т - титан, Ю - алюминий, К - кобальт, Д - медь, Р - бор, Ц - цирконий, Б - ниобий, П - фосфор, А - азот, Ч - редкоземельные металлы.

Каждая марка стали составляется из сочетания букв и цифр. Первые две цифры обозначают содержание углерода в сотых долях процента, а количество легирующих элементов указывается в процентах цифрами, стоящими после соответствующей буквы. Если легирующего элемента около 1% или менее, то цифра после буквы не ставится. Например, сталь 18ХГТ содержит $0,17-0,23\%C$; $1,00-1,30\%Cr$; $0,80-1,10\%Mn$; $0,06-0,12\%Ti$.

В сталях инструментальных и с особыми свойствами такая маркировка содержания углерода часто не выдерживается. Так в инструментальных сталях количество углерода обычно обозначается только одной цифрой в десятых долях процента, например, 5ХНМ, 7Х3, 6ХС и

другие. Кроме того, в инструментальных сталях, имеющих углерода 1% и более, цифры, обозначающие его содержание, полностью опускают. Например, сталь X12M содержит 1,45-1,70%C; 11,0-12,5%Cr; 0,40-0,60%Mo.

Буква А, стоящая в конце марки, указывает, что сталь высококачественная и имеет пониженное содержание серы и фосфора. Например, сталь для азотирования 35ХМЮА содержит серы и фосфора менее 0,025%, тогда как в цементуемой качественной стали 18ХГТ серы и фосфора менее 0,035%.

Некоторые марки сталей выделены в особые группы и обозначаются буквами, стоящими в начале марки: быстрорежущие - Р, шарикоподшипниковые - Ш, для постоянных магнитов - Е, электротехнические - Э и другие. Например, Р18, Р9Ф5, ШХ15, ЕХ3, Э42 и т.д.

Легированные стали могут быть классифицированы по следующим признакам: составу, назначению, микроструктуре в равновесном состоянии и после охлаждения на воздухе.

1.1. Классификация легированной стали по составу

В зависимости от основных легирующих элементов легированные стали по составу классифицируются как хромистые, марганцовистые, кремнистые, хромоникелевые, хромоникельмолибденовые и другие.

1.2. Классификация легированной стали по назначению

По назначению легированные стали разделяются на три основные группы: конструкционные, инструментальные, стали и сплавы с особыми свойствами.

1. Конструкционные стали применяются для изготовления деталей машин. Они подразделяются на цементуемые и улучшаемые. Легирующие элементы в конструкционные стали вводятся, в основном, для повышения прокаливаемости.

Цементуемые легированные стали имеют низкое содержание углерода (0,10-0,25%) для того, чтобы после цементации, закалки и низкого отпуска детали имели твердый поверхностный слой и вязкую сердцевину. Твердость поверхностного слоя после такой обработки около 60HRC, а сердцевины - находится в пределах 15-30HRC. К цементуемым относятся стали 15Х; 20Х; 18ХГТ; 12ХН3А; 20Х2Н4А и другие.

Улучшаемые легированные стали содержат 0,30-0,45% углерода и обычно подвергаются термической обработке - улучшению, которая заключается в закалке с последующим высоким отпуском. В качестве легирующих элементов наиболее часто применяются хром, марганец, никель, вольфрам, молибден и кремний. Улучшаемыми являются стали 40Х, 30ХГТ, 30ХГСА, 40ХН, 40ХМ и другие.

2. Инструментальные легированные стали имеют повышенное содержание углерода, который обеспечивает получение высокой твердости путем термической обработки. Легирующие элементы в инструментальные стали вводятся для увеличения прокаливаемости, красностойкости, жаропрочности, а в ряде случаев для повышения износостойкости за счет образования карбидов.

В зависимости от назначения и химического состава инструментальные легированные стали делятся на три группы: стали для режущего и измерительного инструмента (пониженной прокаливаемости марок 7ХФ, 8ХФ, 9ХФВ1 и другие, обычно закаливаемые в воде, и повышенной прокаливаемости марок Х, ХГ, ХВГ, ХВСГ, 9ХВГ, 9ХС, 9Х5ВФ и другие, закаливаемые в масле); быстрорежущие стали, широко применяемые для изготовления режущего инструмента; (нормальной производительности марок Р9, Р12, Р18, Р6М5, Р18Ф2 и повышенной производительности марок Р9Ф5, Р9К5, Р9К10, Р10К5Ф5, Р14Ф4, Р18К5Ф2, содержащие повышенное количество кобальта и ванадия); стали для штампового инструмента (для деформирования в холодном состоянии марок 9Х, Х, Х6ВФ, Х12, Х12М, Х12Ф1; для деформирования с большими ударными нагрузками марок 4ХС, 6ХС, 4ХВ2С, 5ХВ2С, 6ХВ2С, 6ХВГ и для деформирования в горячем состоянии марок 7Х3, 8Х3, 3Х2В8Ф, 4Х8В2, 4Х2В5ФМ, 4Х5В2С, 5ХНМ, 5ХНВ, 5ХНГ, 5ХГМ, 5ХНСВ и другие).

3. Стали и сплавы с особыми свойствами. К ним относятся стали: нержавеющие 12Х13, 20Х13, 08Х18Н10Т; жаропрочные 45Х14Н14В2М, 40Х9С2; износостойкие; с особыми магнитными и электрическими свойствами и другие. Условно принято, что если сумма легирующих элементов превышает 55%, то такой сплав сталью не называют.

1.3. Классификация легированной стали по равновесной структуре

Определение класса стали производится по структуре, которую она имеет после медленного охлаждения из аустенитного состояния, то есть в результате полного отжига. По этой классификации, предложенной П.Обергоффером, легированные стали делятся на шесть классов: доэвтектоидный, эвтектоидный, заэвтектоидный, ледебуритный, аустенитный и ферритный.

Рассматриваемая классификация аналогична классификации углеродистых сталей, однако большинство легирующих элементов сильно искажают диаграмму железо-цементит, сдвигая точки S и E в сторону меньшего содержания углерода. Это объясняется уменьшением предельной растворимости углерода в аустените при введении легирующих элементов, поэтому граница между доэвтектоидными, заэвтектоидными и ледебуритными сталями может лежать при значительно меньшем содержании углерода, чем в углеродистых сталях.

1.4. Классификация легированной стали по структуре после охлаждения на воздухе из аустенитного состояния

Для определения принадлежности к тому или иному классу в соответствии с этой классификацией сталь (в виде образцов толщиной 15-20 мм) нагревают до аустенитного состояния, а затем охлаждают на воздухе, то есть подвергают нормализации.

Эта классификация, предложенная французским ученым Л.Гийе, основывается на уменьшении критической скорости заковки и снижении температурного интервала мартенситного превращения при увеличении содержания легирующих элементов в стали. При одинаковой

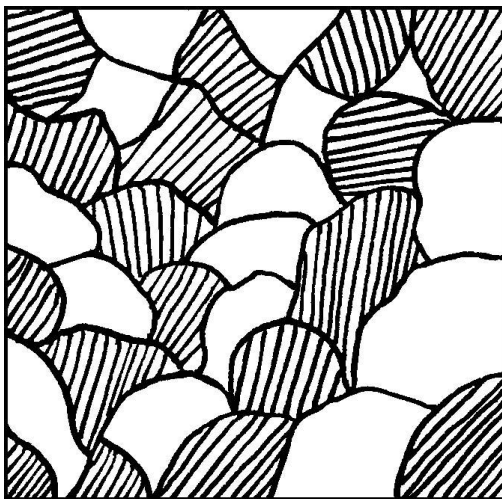
скорости охлаждения (на воздухе) из аустенитного состояния стали с различным содержанием легирующих элементов могут приобретать перлитную, мартенситную или аустенитную структуру. В связи с этим, по структуре после охлаждения на воздухе различают следующие три основных класса сталей: перлитный, мартенситный и аустенитный.

Кроме трех указанных основных классов, характеризующихся по структуре, получаемой сталью при охлаждении на воздухе, существуют карбидный и ферритный классы. Для сталей карбидного класса условным признаком является уже не основная структура образца диаметром 15-20 мм, охлажденного на воздухе из аустенитного состояния, а присутствие значительного количества карбидов, которые образуются при наличии в стали большого количества углерода и карбидообразующих легирующих элементов. Стали ферритного класса по структуре после охлаждения на воздухе из аустенитного состояния совпадают со сталями ферритного класса по структуре в равновесном состоянии.

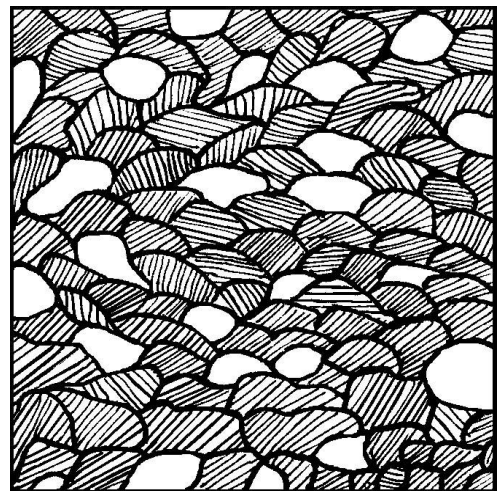
2. МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

2.1. Микроструктура легированных сталей в равновесном состоянии

1. Дозвтектоидные стали имеют структуру феррита и перлита (рисунок 1,а). Количество феррита и перлита в структуре определяется содержанием углерода в стали и концентрацией углерода в эвтектоиде. К этому классу относятся конструкционные стали, например, марок 15Х, 18ХГТ, 18Х2Н4ВА, 30ХГСА, 40Х и многие другие.



а.



б.

Рисунок 1 - Схемы микроструктуры легированной стали доэвтектоидного класса марки 30ХГСА после полного отжига от 880⁰С (а- тонкопластинчатый перлит и феррит) и после нормализации от 880⁰С (б- сорбит и феррит) ×600 (сорбит при увеличениях светового микроскопа так, как показан на схеме, не разрешается)

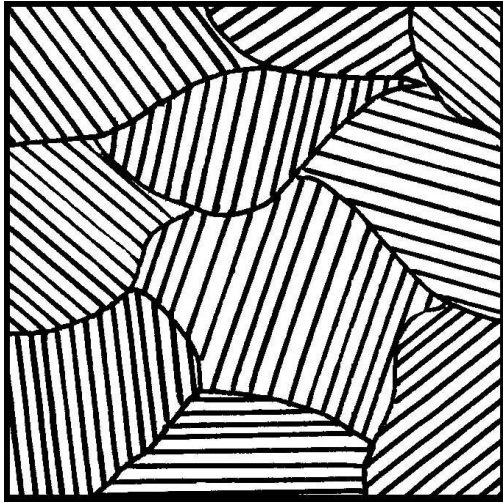
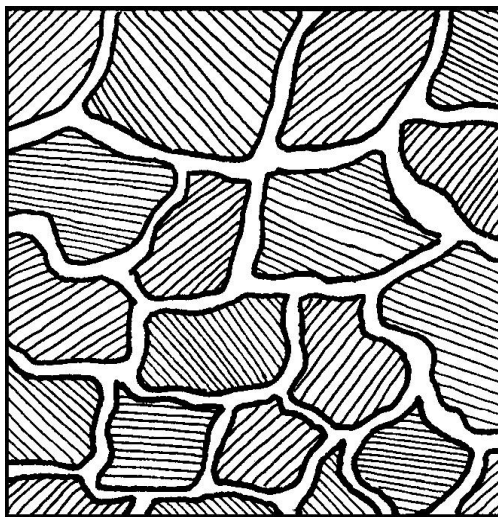


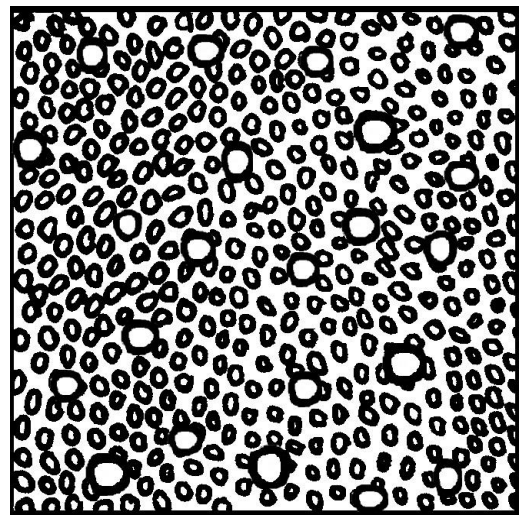
Рисунок 2 - Схема микроструктуры легированной стали эвтектоидного класса марки 70С3А после полного отжига от 860⁰С.

Пластинчатый перлит. $\times 600$

ХГ, содержащая 1,30-1,50%С; 1,30-1,60%Cr и 0,45-0,70%Mn, после полного отжига из однофазного аустенитного состояния имеет структуру, состоящую из тонкопластинчатого перлита и сетки избыточных вторичных карбидов (рисунок 3,а). Сплошная сетка карбидов снижает механические свойства заэвтектоидных сталей, поэтому они подвергаются отжигу на зернистый перлит (рисунок 3,б).



а.



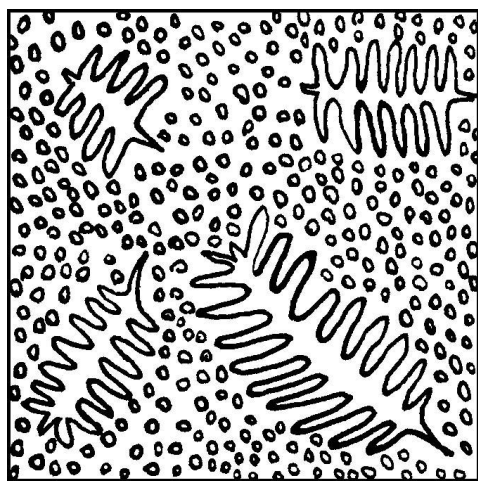
б.

Рисунок 3 - Схема микроструктуры легированной стали заэвтектоидного класса марки ХГ после полного отжига от 1000⁰С (а - тонкопластинчатый перлит и сетка вторичных карбидов) и отжига на зернистый перлит (б - зернистый перлит и вторичные карбиды округлой формы).

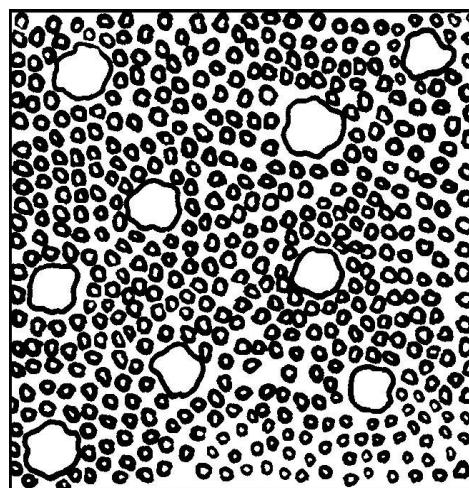
$\times 600$

4. Ледебуритного класса стали содержат в структуре первичные карбиды, выделившиеся из жидкой фазы при кристаллизации и входящие в состав эвтектики - ледебурита. Легирующие элементы могут настолько сильно уменьшить растворимость углерода в аустените, что при концентрации его менее 1% возможно образование ледебурита в стали. Например, в литой быстрорежущей стали марки P18, содержащей 0,70-0,80%С; 17,5-19,0%W; 1,0-1,4%V и 3,8-4,4%Cr, присутствует ледебурит, имеющий в вольфрамовых сталях "скелетообразный" вид. Ледебурит состоит из пластинок карбидов, чередующихся с аустенитом.

При охлаждении в процессе кристаллизации перитектическое превращение (жидкость+ δ -феррит \rightarrow аустенит) не успевает завершиться, и в структуре сохраняется некоторое количество δ -феррита, который в быстрорежущих сталях при дальнейшем охлаждении претерпевает эвтектоидный распад с образованием δ -эвтектоида, состоящего из тонкодисперсной смеси аустенита и карбидов. Из-за большой измельченности δ -эвтектоид сильно травится, имеет вид темных кристаллов округлой формы и плохо отличим в оптическом микроскопе от перлита (рисунок 4,а).



а.



б.

Рисунок 4 - Схема микроструктуры легированной стали ледебуритного класса марки P18 в литом состоянии (а- ледебурит, аустенит и эвтектоид) и после обработки давлением -ковки и отжига (б- крупные первичные и мелкие вторичные карбиды, мелкозернистый перлит). $\times 600$

Карбиды, образовавшиеся в процессе кристаллизации и входящие в состав ледебурита, называются первичными.

По структуре стали ледебуритного класса следовало бы рассматривать как белые чугуны. Однако в результате пониженного содержания углерода они по свойствам значительно ближе к стали, чем к чугунам, что позволяет рассматривать их как стали. Ледебуритные стали обладают более высокой пластичностью, чем белые чугуны, поэтому путем горячей обработки давлением удастся раздробить ледебуритную эвтектику и повысить свойства стали за счет равномерного

распределения карбидов. Структура кованой и отожженной быстрорежущей стали Р18 состоит из крупных первичных карбидов, более мелких вторичных и мелкозернистого перлита, состоящего из легированного феррита и эвтектоидных карбидов (рисунок 4,б).

К ледебуритному классу относятся инструментальные стали - быстрорежущие марок Р9, Р12, Р18, Р9Ф5, Р10К5Ф5 и для штампов холодной штамповки марок Х12, Х12Ф1, Х12М.

5. Аустенитного класса стали содержат большое количество легирующих элементов, которые расширяют область аустенита, повышая его устойчивость, и резко сужают область существования феррита.

Элементами, стабилизирующими аустенитную структуру, являются никель, марганец, медь, азот и углерод. При достаточном их содержании сталь не претерпевает фазовых превращений и сохраняет аустенитную структуру при охлаждении до комнатной температуры.

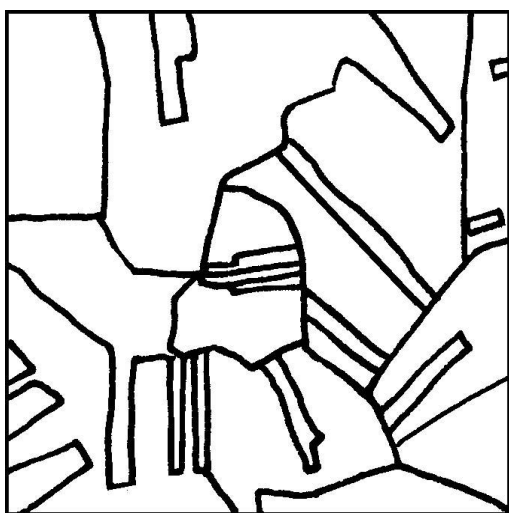


Рисунок 5 - Схема микроструктуры легированной стали аустенитного класса марки 12ХН18Н9Т после закалки от 1050°С в воде. Аустенит. $\times 600$. (Травление в электролите, содержащем 10 г щавелевой кислоты и 100 мл воды, при плотности тока $0,1 \text{ А/см}^2$ в течение 35-45 с)

Для аустенитной структуры характерно наличие внутри зерен прямолинейных границ двойникования. На рисунке 5 показана структура стали 12Х18Н9Т закаленном состоянии. При медленном охлаждении от 1050°С из аустенита выделяются по границам зерен карбиды, снижающие механические свойства. Поэтому стали аустенитного класса часто применяются в однофазном состоянии. аустенита, которое получается путем растворения карбидов при нагреве и последующей закалки в воде. Стали аустенитного класса в зависимости от химического состава могут быть нержавеющей (12Х18Н9Т, 08Х18Н12Т, 04Х18Н10), жаропрочными (08Х18Н10Т, 45Х14Н14В2М), износостойкими (Г13), а также обладать другими особыми свойствами.

Жаропрочность определяется силами межатомного взаимодействия при повышенных температурах, а так как плотность упаковки атомов в аустените максимальная, то стали аустенитного класса обладают наибольшей жаропрочностью. Хром и никель являются основными легирующими компонентами этих сталей. Хром определяет окалиностойкость, а никель - устойчивость аустенита.

В хромоникелевых нержавеющих сталях из-за наличия углерода могут образоваться

специальные карбиды, преимущественно типа $M_{23}C_6$. Выделение карбидов происходит по границам зерен, что при определенных условиях приводит к появлению особого вида коррозионного разрушения по границам зерен, называемого межкристаллитной коррозией.

Благодаря аустенитной структуре эти стали немагнитны, имеют высокую пластичность и многие из них хорошо штампуются в холодном состоянии.

6. Ферритного класса стали имеют высокую концентрацию легирующих элементов, сужающих область аустенита и расширяющих область феррита. К таким элементам относятся: хром, кремний, алюминий, молибден, вольфрам, ванадий, титан и другие.

Для получения перлитной структуры сталь должна иметь минимальное (до 0,1-0,2%) содержание углерода, расширяющего область аустенита. Структура этих сталей состоит, в основном, из легированного феррита, не превращающегося в аустенит при нагреве вплоть до температуры плавления. На рисунке 6 показана микроструктура трансформаторной стали марки Э42, которая вследствие низкого содержания углерода (менее 0,05%) и высокой концентрации кремния (3,8-4,8%) не имеет аллотропического превращения $\alpha \leftrightarrow \gamma$ и поэтому относится к ферритному классу.

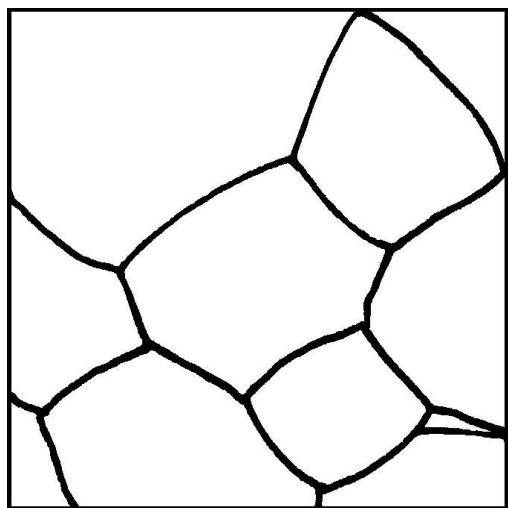


Рисунок 6 - Схема микроструктуры легированной стали ферритного класса марки Э42. Феррит. $\times 600$

Электротехническая сталь имеет по ГОСТу специальную маркировку. Первая цифра за буквой Э показывает примерное содержание кремния в %. Вторая цифра характеризует уровень электротехнических и магнитных свойств (чем цифра больше, тем свойства выше). Кремний, растворяясь в феррите, резко увеличивает электросопротивление и тем самым снижает потери на вихревые токи и гистерезис.

При высоком содержании хрома, кремния и алюминия стали ферритного класса являются жаростойкими (окалиностойкими), так как эти элементы способны образовывать на поверхности

детали плотные пленки окислов, препятствующие проникновению кислорода и образованию окалины. К жаростойким относятся стали марок X17, OX17T, X25T, X28, 1X12CЮ, X18CЮ и другие. Стали ферритного класса в качестве жаропрочных не применяются, так как феррит имеет более низкую плотность упаковки атомов в решетке, чем аустенит. Благодаря ферритной структуре, эти стали обладают ферромагнитными свойствами.

2.2. Микроструктура легированных сталей после охлаждения на воздухе из аустенитного состояния

1. Перлитного класса стали имеют сравнительно малое содержание легирующих элементов,

вследствие чего их критическая скорость закалки оказывается выше скорости охлаждения на воздухе. Поэтому при охлаждении на воздухе происходит распад аустенита диффузионным путем с образованием перлитных структур (перлит, сорбит или троостит), которые отличаются друг от друга различной дисперсностью пластин карбидов и легированного феррита.

К сталям перлитного класса относится большинство конструкционных и инструментальных сталей: 20Х, 40Х, 30ХГСА, Х, ХГ, ХВГ, 9ХС и другие. На рисунке 1,б показана микроструктура стали 30ХГСА в нормализованном состоянии. При ускоренном охлаждении на воздухе весь феррит не успевает выделиться из аустенита, который превращается в сорбит. Поэтому после нормализации зерен феррита значительно меньше, чем после полного отжига.

2. Мартенситного класса стали содержат больше легирующих элементов по сравнению со сталями перлитного класса. Легирующие элементы, повышая устойчивость переохлажденного аустенита к распаду, настолько снижают критическую скорость закалки, что она оказывается меньше скорости охлаждения на воздухе. Поэтому при охлаждении на воздухе сталь закаливается

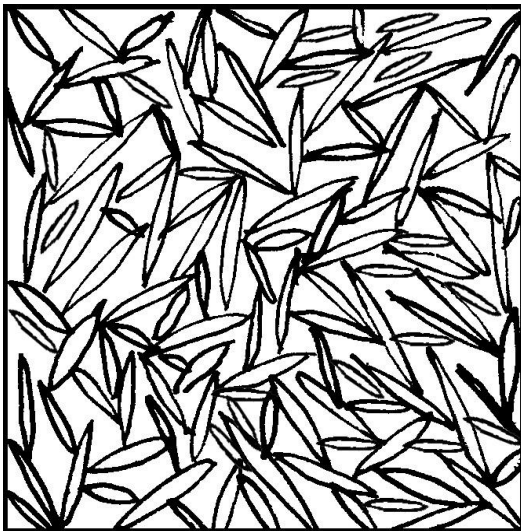


Рисунок 7 - Схема микроструктуры легированной стали мартенситного класса марки 20Х13 после нормализации от 1050°С: мартенсит и остаточный аустенит. $\times 600$ (травление в электролите, содержащем 5-10 г щавелевой кислоты и 100 мл воды, при плотности тока 0,1 А/см² в течение 60-80 с)

на мартенситную структуру (рисунок 7). К мартенситному классу относятся стали марок 20Х2Н4А, 20Х13, 30Х13, 50Х13, Р9, Р6М5, Р18 и другие.

3. Аустенитного класса стали содержат большое количество легирующих элементов, которые снижают температуру начала мартенситного превращения в область отрицательных температур и настолько повышают устойчивость аустенита, что он после охлаждения на воздухе совершенно не распадается при комнатной температуре. К аустенитному классу относятся стали марок 12Х18Н9Т, Г13, 45Х14Н14В2М и другие (см. рисунок 5).

4. Для сталей карбидного класса условным признаком является уже не основная структура образца диаметром 15-20 мм, охлажденного на воздухе от аустенитного состояния, а присутствие значительного количества карбидов, которые образуются при наличии в стали большого количества углерода и карбидообразующих легирующих элементов.

Легирующие элементы, растворяясь в цементите, способны образовывать легированный цементит, например, $(\text{Fe}, \text{Mo})_3\text{C}$, $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$, $(\text{Fe}, \text{W})_3\text{C}$. Легированный цементит и специальные

карбиды типа M_6C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$ (где M - карбидообразующие элементы), например, Fe_3Mo_3C , Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, имеющие сложную кристаллическую решетку, построенную из закономерно расположенных атомов металла и углерода, относятся к карбидам первой группы.

Металлы, для которых отношение атомного радиуса углерода (0,079 нм) к их собственному радиусу меньше 0,59, способны образовывать специальные карбиды типа M_2C и MC (MO_2C , W_2C , WC , VC , TiC и другие), являющиеся фазами внедрения. Эти карбиды имеют сравнительно простую кубическую или гексагональную решетку, построенную из атомов металла, а атомы углерода внедрены в нее. Карбиды, представляющие фазы внедрения, относятся ко второй группе.

Однако в чистом виде перечисленные карбиды в сталях не существуют. Все они растворяют железо, а при наличии нескольких карбидообразующих элементов - и эти элементы. Так, в хромомарганцовистой стали вместо специального карбида хрома $Cr_{23}C_6$ образуется сложный карбид $(Cr,Mn,Fe)_{23}C_6$, содержащий в твердом растворе железо и марганец.

Следует отметить, что фазы внедрения значительно труднее растворяются в аустените при нагревании, чем карбиды первой группы и тем более, чем простой цементит Fe_3C . Поэтому для растворения карбидов в аустените легированные стали нагревают при термической обработке до более высоких температур, чем углеродистые стали.

Карбиды повышают износостойкость, твердость и режущие свойства легированных сталей. К карбидному классу относятся инструментальные стали, например, марок P9, P18, X12, X12Ф1, XB5 и многие другие (см. рисунок 4).

5. Ферритного класса стали имеют минимальное содержание углерода при большом количестве легирующих элементов, расширяющих область α -железа (феррита). Такие стали кристаллизуются с образованием структуры легированного феррита, который ни при охлаждении, ни при нагревании не превращается в аустенит (см. рисунок 6).

Из всех рассмотренных выше структурных классов легированных сталей к **износостойким** относятся стали мартенситного, карбидного и аустенитного классов. Два первых обеспечивают стойкость к механическому износу благодаря высокой твердости, стали аустенитного класса приобретают износостойкость поверхностного слоя в процессе эксплуатации благодаря способности легко наклёпываться (упрочняться) по механизму двойникования. Кроме того, парамагнитный аустенит стоек к окислительному износу в условиях коррозионно-механического изнашивания. Все эти типы сталей могут быть использованы в качестве наплавленных или напылённых покрытий.

Среди чугунов к износостойким принято относить только белые чугуны, которые благодаря присутствию в структуре большого количества цементита имеют очень высокую твердость. Однако, они не могут быть использованы для деталей, подвергающихся ударным или циклическим нагрузкам из-за высокой хрупкости. Белые чугуны имеют высокую стойкость в условиях контактных статических нагрузок, например, при трении качения. Легированные чугуны

сложного химического состава (с большим содержанием углерода, хрома, вольфрама, бора и др.) применяют для получения износостойких покрытий методом порошковой дуговой, лазерной или индукционной наплавки.

2.3. Микроструктура белого чугуна

В соответствии с диаграммой состояния железо-цементит белый чугун может быть доэвтекктическим с содержанием углерода менее 4,3%, эвтекктическим при 4,3% углерода и заэвтекктическим с концентрацией углерода более 4,3%.

При охлаждении доэвтекктического состава из жидкого состояния до линии ликвидус BC никаких превращений не происходит. От температур линии ликвидус BC до линии солидус EC кристаллизуется аустенит переменного состава, что приводит (при 1147°C) к увеличению содержания в жидком чугуне углерода до 4,3% и эвтекктическому превращению, при котором происходит одновременная кристаллизация из жидкости двух фаз - аустенита с концентрацией 2,14% C и цементита, приводящая к образованию ледебурита. Дальнейшее охлаждение, за счет выделения вторичного цементита в соответствии с линией ES сопровождается снижением содержания углерода в аустените до 0,8% C, эвтектоидным превращением по линии PSK, в результате чего микроструктура доэвтекктического белого чугуна ниже 727°C , состоит из перлита в виде темных участков, ледебурита в виде темных точечных перлитных включений на белом фоне цементита и вторичного цементита, который может быть в виде светлых отдельных включений и игл, и может сливаться с цементитом ледебурита (рисунок 8). С увеличением содержания углерода в чугуне количество ледебурита возрастает, а перлита уменьшается.

Микроструктура эвтекктического белого чугуна состоит из ледебурита, представляющего собой при температурах выше линии PSK (727°C) смесь аустенита и цементита (эвтекктического и вторичного), а ниже - смесь перлита и цементита (рисунок 9).



Рисунок 8 – Схема микроструктуры доэвтекктического белого чугуна. Ледебурит и перлит. $\times 350$

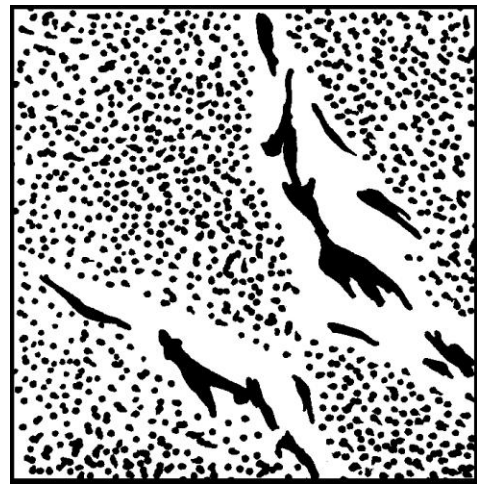


Рисунок 9 – Схема микроструктуры эвтекктического белого чугуна. Ледебурит. $\times 350$

Микроструктура заэвтектического белого чугуна состоит из крупных светлых пластин первичного цементита и ледебурита (рис. 10).

В результате кристаллизации первичного цементита ниже линии DC диаграммы жидкий чугун обезуглероживается и при температуре 1147⁰С (линия ECF) с содержанием углерода 4,3% затвердевает в эвтектику - ледебурит, которая при нормальной температуре представляет собой смесь перлита и цементита; с повышением содержания углерода в заэвтектическом чугуне количество первичного цементита возрастает, количество ледебурита

уменьшается. Высокое содержание эвтектического, первичного и вторичного цементита в белом чугуне придает ему высокую твердость, хрупкость и износостойкость. Белый чугун очень плохо обрабатывается режущим инструментом. Применяется при литье только износостойких отливок, не требующих обработки (шары для шаровых мельниц, прокатные валки, вагонные колеса с отбеленным ободом и некоторые другие). Белый чугун своим названием обязан матово-белому цвету излома.

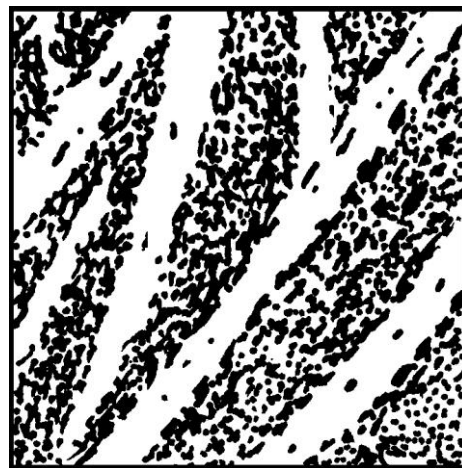


Рисунок 10 – Схема микроструктуры заэвтектического белого чугуна. Ледебурит и первичный цементит. $\times 350$

3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Уясните цель работы.

3.2. Изучите сущность легирования стали, классификацию легирующих элементов, особенности маркировки и принципы классификации легированной стали по составу, назначению, структуре в равновесном состоянии и после охлаждения на воздухе из аустенитного состояния.

3.3. Сопоставьте микроструктуру легированных сталей.

3.4. Изобразите схемы микроструктур различных классов легированной стали и чугуна.

3.5. Выполните микроструктурный анализ различных классов легированной стали и чугуна, выделите из них и опишите износостойкие материалы.

3.6. Составьте отчет о работе.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- Цель работы.
- Определение легированной стали.
- Классификация легирующих элементов.
- Особенности маркировки легированных сталей.

- Принципы классификации легированной стали по структуре в равновесном состоянии и после охлаждения на воздухе из аустенитного состояния.
- Схемы микроструктур различных классов легированной стали.
- Микроструктурный анализ различных классов износостойких легированных сталей и чугунов.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие стали называются легированными?
2. Какие легирующие элементы являются карбидо- и некарбидообразующими?
3. Как маркируются легированные стали?
4. По каким признакам классифицируют легированную сталь?
5. На какие группы подразделяются легированные стали по назначению?
6. На какие классы делятся легированные стали по структуре в равновесном состоянии?
7. Какие легирующие элементы содержат стали аустенитного и ферритного классов?
8. На какие классы делятся легированные стали по структуре после охлаждения на воздухе из аустенитного состояния?
9. Какие стали относятся к износостойким и почему?
10. Какие чугуны являются износостойкими, назовите их структурные особенности?

РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуляев А.П. Металловедение.- М.: Металлургия, 1986. - 544 с.
2. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. - М.: Металлургия, 1984. - 360 с.

Лабораторная работа №2

МИКРОСТРУКТУРА АНТИФРИКЦИОННЫХ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Диаграммы состояния определяют фазовый состав и структуру сплавов в условиях равновесия, дают возможность решать вопросы их упрочнения путем термической обработки и поэтому являются основой классификации сплавов цветных металлов. По технологическим свойствам сплавы делят на деформируемые, находящиеся в состоянии твердых растворов и хорошо обрабатываемые давлением, и литейные, имеющие в структуре эвтектику и обладающие наилучшей жидкотекучестью. По способности упрочняться с помощью термической обработки цветные сплавы подразделяют на неупрочняемые и упрочняемые термической обработкой - закалкой без полиморфного превращения и старением.

Упрочняемыми термической обработкой являются сплавы, для которых характерно уменьшение растворимости компонентов в твердом состоянии при снижении температуры до нормальной (комнатной). В промышленности широкое применение находят как двойные, тройные, так и поликомпонентные сплавы цветных металлов, фазовый состав и структура которых в условиях равновесия определяются соответствующими диаграммами состояния. Несмотря на это, при небольшом содержании легирующих элементов в большинстве случаев вполне достаточным для качественного описания изменений фазового состава, структуры является использование наглядных двойных диаграмм состояния "цветной металл - основной легирующий элемент". В соответствии с подобной диаграммой "алюминий - легирующий элемент" (рисунок 1) сплавы с содержанием легирующего элемента до проекции точки В на ось концентраций являются деформируемыми, а с большим содержанием - литейными. При этом сплавы с содержанием легирующего элемента до точки D не упрочняются в результате термической обработки, а сплавы с большим содержанием являются упрочняемыми термической обработкой. Наиболее широко распространены цветные сплавы на основе алюминия, меди, магния, олова.

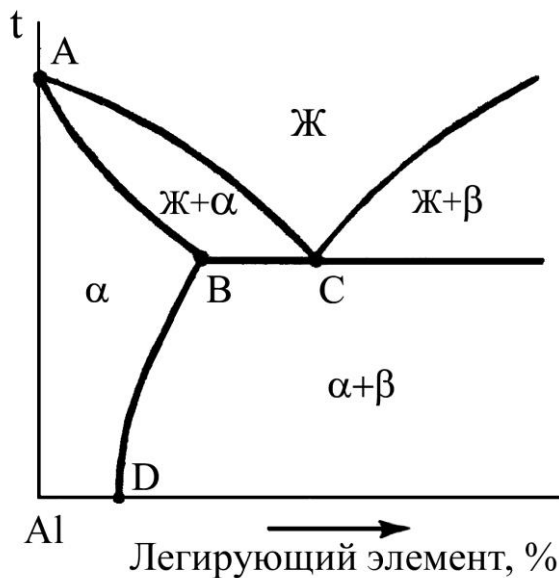


Рисунок 1 - Фрагмент диаграммы состояния системы алюминий - легирующий элемент

Алюминиевые сплавы в соответствии с диаграммой состояния "алюминий - легирующий элемент" (см. рисунок 1) делят на деформируемые и литейные. Промышленное применение находят как двойные деформируемые сплавы алюминия с медью, магнием, марганцем, кремнием, так и поликомпонентные сплавы систем Al-Cu-Mg (дуралюмины), Al-Cu-Si (авиали) и др. Значительное место среди этих сплавов занимают дуралюмины, маркируемые буквой Д и цифрами, характеризующими порядковый номер сплава по ГОСТ 4784-74, например, Д1, Д6, Д16.

Наиболее распространенный из них сплав марки Д1 содержит в качестве легирующих элементов 3,8-4,8%Cu; 0,4-0,8%Mg; 0,4-0,8%Mn.

Дуралюмины относятся к сплавам, упрочняемым термической обработкой. К литейным относятся сплавы алюминия с кремнием, медью, магнием. Литейные сплавы маркируются буквами АЛ и цифрами, обозначающими порядковый номер сплава (ГОСТ 2685-75), например, АЛ2, АЛ3. Наибольшее распространение получили силумины (сплавы алюминия с кремнием), содержащие от 5 до 13% Si. Фазовый состав, структуру и свойства силуминов можно варьировать изменением химического состава, модифицированием - введением веществ, которые уже в малых количествах (обычно не более десятых долей процента) способствуют кристаллизации структурных

составляющих в измельченной форме, а также термической обработкой. В качестве модифицирующих добавок используются марганец, никель, хром, титан, ванадий, и некоторые другие элементы. Силумины обычно модифицируют натрием, который в жидкий сплав вводят в виде смеси фтористых и хлористых солей натрия в соотношении $2/3\text{NaF} + 1/3\text{NaCl}$.

Важнейшими сплавами на основе меди являются латуни (сплавы меди с цинком) и бронзы (сплавы меди со всеми элементами, кроме цинка). По технологическим свойствам медные сплавы подразделяют на деформируемые и литейные, по способности упрочняться - на неупрочняемые и упрочняемые термической обработкой.

Двойные деформируемые латуни маркируются буквой Л и цифрой, показывающей среднее содержание меди в процентах (ГОСТ 15527-70), например, Л96, Л90, Л80, Л70, Л62, Л59. Латуни с содержанием меди 90% и более называются томпаком (например, сплав марки Л96), при 80-85% - полутомпаком (Л80). В марках легированных деформируемых латуней кроме цифры, показывающей содержание меди, указываются буквы и цифры, обозначающие легирующий элемент и его содержание в процентах. Например, сплав ЛАН59-3-2 содержит 59%Cu, 3%Al, 2%Ni, остальное Zn. В марках литейных латуней указывается содержание цинка, а содержание каждого легирующего элемента ставится непосредственно за буквой, его обозначающей. Например, сплав ЛЦ40Мц3А содержит 40%Zn, 3%Mn, 1%Al, остальное Cu.

Бронзы по основным легирующим элементам подразделяют на оловянистые, свинцовистые, кремнистые и др. В бронзах в качестве легирующей добавки в небольших количествах может присутствовать и цинк. Деформируемые бронзы маркируют буквами Бр, за которыми следуют буквы и цифры, обозначающие название и содержание в процентах легирующих элементов (ГОСТ 5017-74). Например, сплав БрОЦС4-4-2,5 содержит 4%Sn, 4%Zn, 2,5%Pb, остальное Cu. В марках литейных бронз (ГОСТ 613-73) содержание каждого легирующего элемента указывается сразу после буквы, обозначающей его название. Например, сплав БрО6Ц6С3 содержит 6%Sn, 6%Zn, 3%Pb, остальное Cu.

Магниевого сплавы, легирующими элементами которых являются алюминий, цинк, кремний, а также редкие металлы - неодим, торий и другие, подразделяются на деформируемые и литейные, маркируемые соответствующими буквами МА и МЛ и цифрами, соответствующими номеру сплава (ГОСТ 14957-76 и 2856-79). Магниевого сплавы, как деформируемые, так и литейные, подвергают модифицированию и упрочняющей термической обработке.

Сплавы на основе олова (оловянистые баббиты) являются высококачественными антифрикционными материалами, для которых важным является наличие гетерогенной (неоднородной) структуры, состоящей из мягкой, пластичной основы, обеспечивающей прирабатываемость подшипника к валу, и твердых включений, упрочняющих материалы и препятствующих схватыванию трущихся поверхностей. Оловянистые баббиты представляют собой трехкомпонентные сплавы системы олово-сурьма-медь. Наиболее широкое применение

имеет сплав марки Б83 (ГОСТ 1320-74), содержащий 83%Pb, 11%Sb и 6%Cu.

2. МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ

Микроструктура цветных сплавов в условиях равновесия или близких к ним может быть определена с помощью их диаграмм состояния.

2.1. Микроструктура сплавов на основе алюминия

В качестве характерных представителей деформируемых и литейных алюминиевых сплавов в работе используются соответственно литой дуралюмин марки Д1 и силумин марки АЛ2.

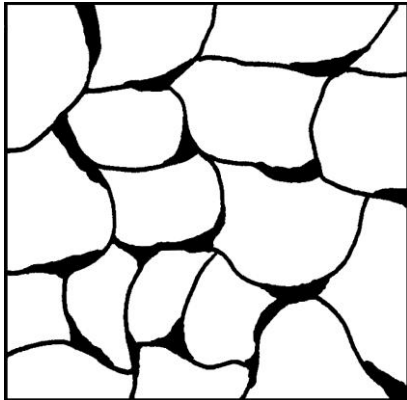


Рисунок 2 - Схема микроструктуры дуралюмина марки Д1 в литом состоянии. α -фаза и Θ -фаза. $\times 340$

Основу сплавов типа дуралюмин составляет система Al-Cu-Mg. В соответствии с ней медь и магний имеют ограниченную растворимость в твердом состоянии в алюминии, а избыточными фазами, выделяющимися при охлаждении из α -твердого раствора меди и магния в алюминии в связи с уменьшением растворимости компонентов при снижении температуры являются соединения CuAl_2 и Al_2MgCu , называемые соответственно Θ и S фазами. Поскольку магний в сплаве находится в небольшом количестве, то фаза S при используе-

мых в работе увеличениях микроскопа в структуре не обнаруживается. Поэтому наблюдаемая микроструктура сплава марки Д1 в литом состоянии состоит из светлых зерен α -твердого раствора меди и магния в алюминии и темных включений Θ -фазы (соединения CuAl_2), располагающихся по границам зерен α -фазы (рисунок 2). Такую структуру дуралюмина марки Д1 можно предсказать, исходя из двойной диаграммы состояния системы Al-Cu, подобной изображенной на рисунке 1.

Дуралюмины, как и авиали (сплавы системы Al-Cu-Si) применяют для изготовления горячей или холодной обработкой давлением листов, труб, проволоки, плит и различных профилей.

Микроструктура силуминов соответствует двойной диаграмме состояния системы Al-Si (рисунок 3), доэвтектические сплавы состоят из первичных кристаллов α -твердого раствора кремния в алюминии и зерен эвтектики ($\alpha+\beta$). В свою очередь, структура заэвтектических сплавов состоит из крупных первичных кристаллов - твердого раствора алюминия в кремнии в виде игл и зерен эвтектики ($\alpha+\beta$). В соответствии с диаграммой состояния Al-Si сплав марки АЛ2, содержащий 12-13%Si, является заэвтектическим.

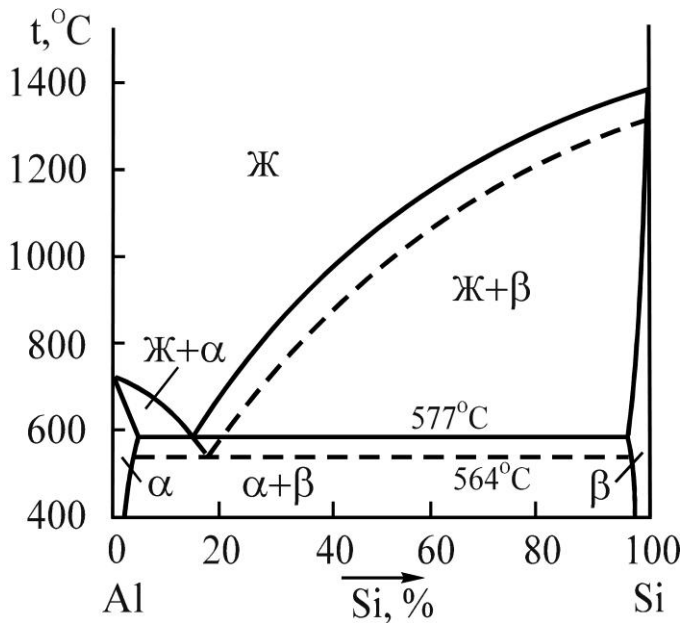


Рисунок 3 - Диаграмма состояния системы алюминий – кремний

Поэтому его микроструктура состоит из более темных крупных игл β -твердого раствора алюминия в кремнии и эвтектики в виде более темных игл β -твердого раствора алюминия в кремнии на светлом поле α -твердого раствора кремния в алюминии (рисунок 4). Сплав в таком структурном состоянии обладает низким комплексом механических свойств (предел прочности при растяжении $\sigma_B=130-140\text{МПа}$, относительное удлинение $\delta=1-2\%$). Поэтому для повышения свойств производят модифицирование. Применительно к силуминам оно заключается в обработке перед разливкой сплава смесью фтористых и хлористых солей натрия в соотношении $2/3\text{NaF}+1/3\text{NaCl}$. Это обеспечивает введение в сплав $0,1\%\text{Na}$, который осуществляет модифицирующее действие, затрудняя кристаллизацию β -твердого раствора алюминия в кремнии. Модифицирование вызывает смещение линий на диаграмме состояния Al-Si (см. рисунок 3). Эвтектическая точка ($11,6\%\text{Si}$) перемещается вправо, приобретая концентрацию кремния $14,6\%$, в результате чего сплав становится доэвтектическим, что

исключает из структуры крупные первичные иглы β -твердого раствора алюминия в кремнии и тем самым повышает пластичность. Линия эвтектического превращения снижается с 577 до 564°C , в связи с чем эвтектика ($\alpha+\beta$) вместо грубоигольчатой становится мелкозернистой. Поэтому

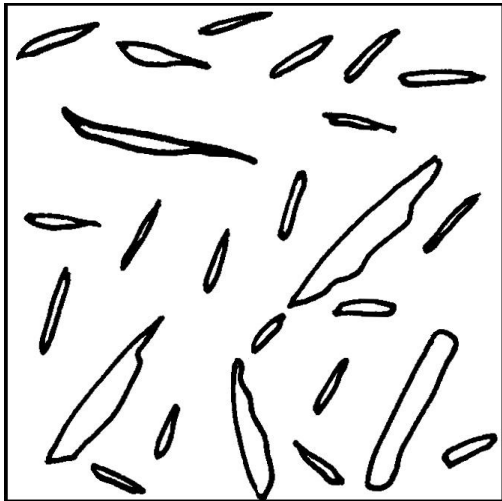


Рисунок 4 - Схема микроструктуры силумина марки АЛ12 до модифицирования, β -фаза и эвтектика ($\alpha+\beta$). $\times 250$

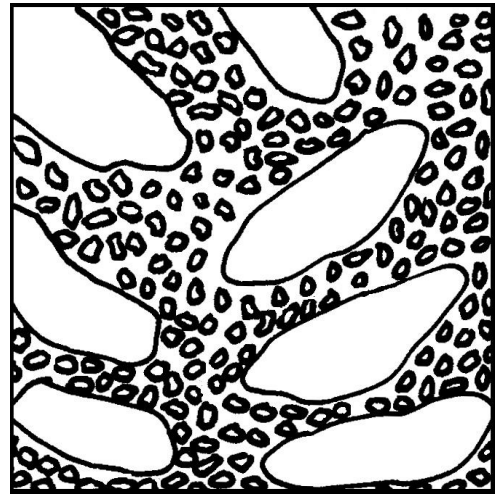


Рисунок 5 - Схема микроструктуры силумина марки АЛ12 после модифицирования. α -фаза и эвтектика ($\alpha+\beta$). $\times 250$

исключает из структуры крупные первичные иглы β -твердого раствора алюминия в кремнии и тем самым повышает пластичность. Линия эвтектического превращения снижается с 577 до 564°C , в связи с чем эвтектика ($\alpha+\beta$) вместо грубоигольчатой становится мелкозернистой. Поэтому

микроструктура сплава марки АЛ2 после модифицирования состоит из светлых первичных зерен α -твердого раствора кремния в алюминии и мелкозернистой эвтектики в виде более темных включений β -твердого раствора алюминия в кремнии на светлом поле α -твердого раствора кремния в алюминии (рисунок 5). Силумины применяются для изготовления корпусов компрессоров, картеров и блоков цилиндров двигателей и др.

2.2. Микроструктура сплавов на основе меди

В качестве характерных представителей сплавов на медной основе в работе используются сплавы марок Л68 и Л59 (латуни) и БрО10 и БрС30 (бронзы).

Микроструктура двойных низколегированных латуней в условиях равновесия определяется диаграммой состояния системы Cu-Zn. На рисунке 6 приведен фрагмент этой диаграммы, отражающей фазовые равновесия в сплавах с содержанием цинка до 50%, поскольку промышленное применение находят латуни, содержащие до 45%Zn. В соответствии с этой диаграммой состояния латуни по структуре делятся на однофазные (α -латуни), содержащие до 39%Zn и состоящие из зерен α -твердого раствора цинка в меди, и двухфазные ($\alpha+\beta$)-латуни, содержащие от 39 до 45%Zn и состоящие из зерен α -твердого раствора цинка в меди и зерен β -твердого раствора на основе соединения CuZn.

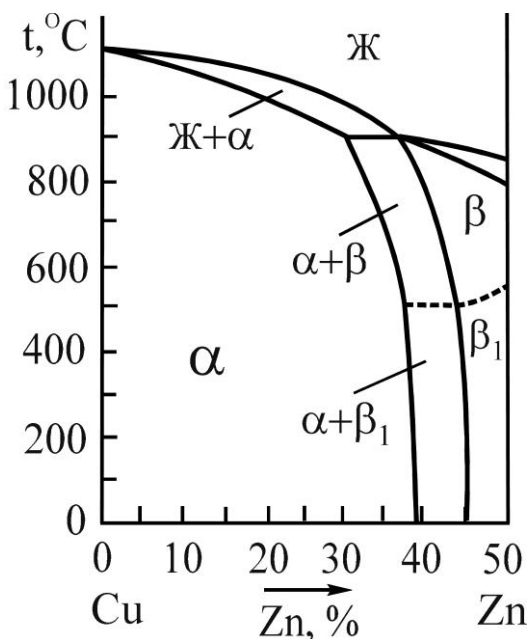


Рисунок 6 - Фрагмент диаграммы состояния системы медь-цинк

Однофазные α -латуни обладают высокой пластичностью при нормальной (комнатной) температуре. Поэтому однофазные латуни выпускают в виде полуфабрикатов, полученных холодной обработкой давлением (штамповкой, прокаткой или протяжкой) листов, труб, лент, проволоки, из которых методом глубокой вытяжки изготавливают радиаторные трубы, снарядные гильзы, сильфоны, трубопроводы, а также производят детали (шайбы, втулки, уплотнительные кольца), не требующие высокой твердости. Холодная обработка вызывает наклеп.

В наклепанном состоянии латунь с содержанием цинка 20% и выше подвержена растрескиванию по границам зерен, имеет низкую коррозионную стойкость. Поэтому ее подвергают рекристаллизационному отжигу, в результате чего однофазная латунь приобретает зеренную структуру с характерными для пластичных сплавов двойниками. На рисунке 7 показана микроструктура однофазной латуни марки Л68. Поскольку зерна α -фазы выходят на поверхность микрошлифа различными кристаллографическими плоскостями, степень их травимости реактивом

различна и они имеют неодинаковую окраску.

Микроструктура двухфазной латуни марки Л59 в литом состоянии, представленная на рисунке 8, состоит из светлых зерен α -твердого раствора цинка в меди и темных (более богатых цинком и травящихся сильнее) зерен β -твердого раствора на базе химического соединения CuZn . Присутствие в структуре β - фазы, имеющей низкую пластичность и высокую твердость, повышает характеристики прочности латуней. Двухфазные латуни являются более пластичными при температурах выше 500°C . Поэтому эти латуни выпускают в виде полуфабрикатов, полученных горячей обработкой давлением, - листов, прутков, труб, штамповок, из которых изготавливают втулки, гайки, тройники, штуцеры, токопроводящие детали электрооборудования и др.

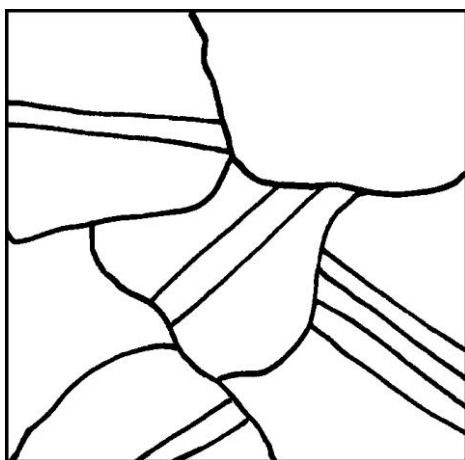


Рисунок 7 - Схема микроструктуры однофазной латуни марки Л68 после холодной пластической деформации и рекристаллизационного отжига, α -фаза.

×440

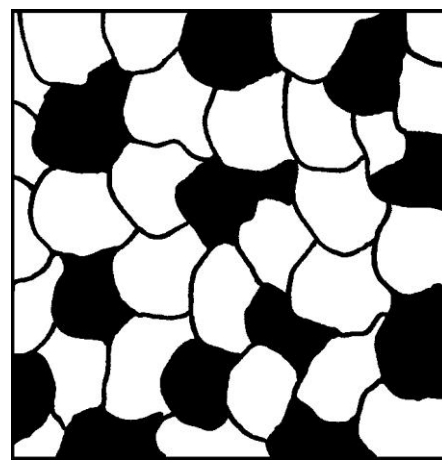


Рисунок 8 - Схема микроструктуры двухфазной латуни марки Л59 в литом состоянии. α -фаза и β -фаза. ×440

Легированные латуни применяют в качестве деформируемых и литейных. Последние, как правило, содержат большое количество цинка и легирующих элементов.

В промышленности находят применение как двойные – оловянные, свинцовистые и др. бронзы, так и многокомпонентные, содержащие кроме основных легирующих элементов добавки свинца, цинка, фосфора и никеля.

Микроструктура двойных оловянных бронз определяется диаграммой состояния системы Cu-Sn . На рисунке 9 приведен фрагмент этой диаграммы для сплавов с содержанием олова до 30%, поскольку промышленное применение имеют сплавы, содержащие до 20%Sn. Сплошными линиями показаны границы фазовых областей равновесной системы.

В соответствии с этой диаграммой состояния бронзы по структуре делятся на однофазные, состоящие из зерен α -твердого раствора олова в меди, и двухфазные, состоящие из зерен α -твердого раствора олова в меди и зерен эвтектоида ($\alpha+\delta$), в котором δ -фаза представляет собой соединение $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$.

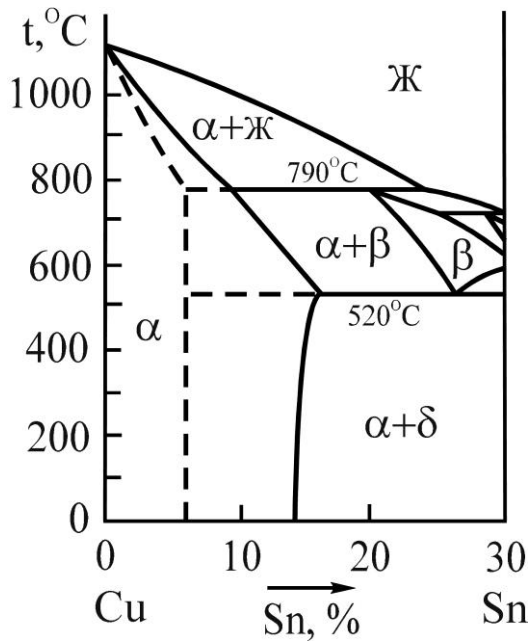


Рисунок 9 - Фрагмент диаграммы состояния системы медь-олово

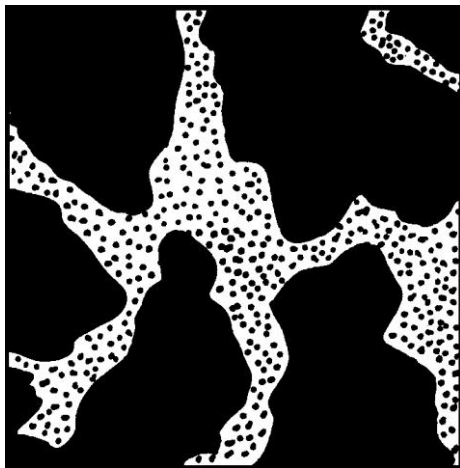


Рисунок 10 - Схема микроструктуры двухфазной бронзы марки БрО10 в литом состоянии. α -фаза и эвтектоид ($\alpha+\delta$). $\times 600$

При очень медленном охлаждении протекает равновесная кристаллизация и граница между однофазными и двухфазными бронзами соответствует 14% олова. В реальных заводских условиях при литье в металлические и земляные формы происходит ускоренное охлаждение сплавов, в связи с чем диффузия атомов олова в меди затрудняется и сплавы ведут себя так, как если бы растворимость олова в меди была постоянной, равной 6-8%, и не менялась с температурой (пунктирные линии на рисунок 9). Исходя из этого, однофазными являются бронзы с содержанием олова не более 5-6%. Такие сплавы имеют высокую пластичность и являются деформируемыми.

Бронзы, содержащие олово в большем количестве, по структуре являются двухфазными. Микроструктура двухфазной бронзы марки БрО10 состоит из темных зерен α -твердого раствора олова в меди и зерен эвтектоида ($\alpha+\delta$) (рисунок 10). Основой эвтектоида является δ -фаза (химическое соединение $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$), на белом поле которой расположены мелкие темные выделения α -фазы. Наличие твердой и хрупкой δ -фазы исключает возможность обработки давлением, поэтому такие бронзы применяют только в литом состоянии.

Для повышения свойств в оловянистые бронзы вводят различные добавки: цинк для улучшения жидкотекучести и повышения плотности отливок; фосфор как раскислитель для устранения нежелательной окиси олова SnO_2 , присутствующей в бронзах в виде твердых и хрупких включений; свинец для улучшения обрабатываемости резанием и повышения уровня антифрикционных свойств. Оловянистые бронзы с перечисленными добавками находят в промышленности более широкое применение, чем двойные сплавы. В качестве примера можно назвать литейные бронзы марок БрО5Ц5С5, БрО10Ф1 и др., деформируемые бронзы марок БрОФ6,5-0,4, БрОЦ4-3 и др. Оловянистые бронзы используются для изготовления паровой и

водяной арматуры, подшипников скольжения, втулок, зубчатых колес, деталей приборов.

Микроструктуру свинцовистых бронз можно охарактеризовать с помощью двойной диаграммы состояния системы Cu-Pb (рисунок 11). Как видно из диаграммы состояния, свинцовистая бронза марки БрС30 с содержанием свинца 30% является доэвтектическим сплавом и его структура при нормальной (комнатной) температуре должна состоять из зерен α -твердого раствора свинца в меди и эвтектики, состоящей из α -твердого раствора свинца в меди и β -твердого раствора.

Однако эвтектика по составу совпадает с чистым свинцом (99,98%), а α -фаза - с чистой медью, поэтому можно сказать, что фактически микроструктура сплава состоит из зерен двух металлов - свинца и меди.

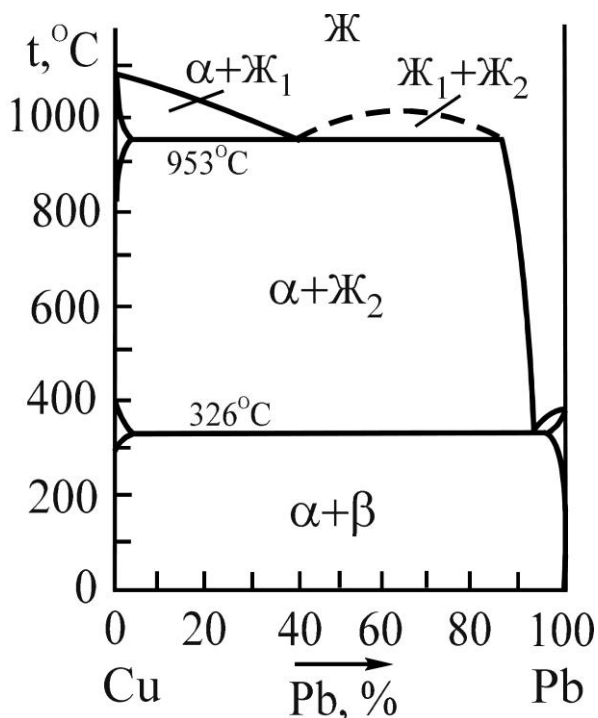


Рисунок 11 - Диаграмма состояния системы медь-свинец

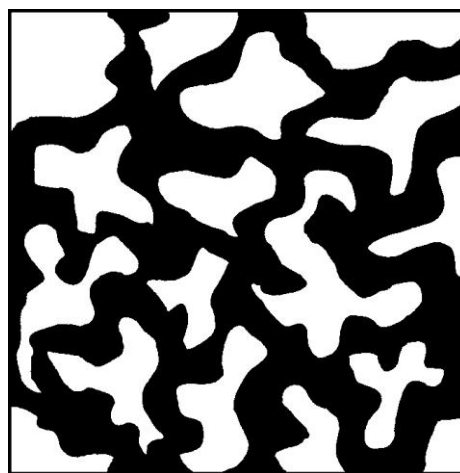


Рисунок 12 - Схема микроструктуры свинцовистой бронзы марки БрС30 в литом состоянии. α -фаза и эвтектика ($\alpha + \beta$). $\times 340$

На рисунке 12 представлена микроструктура свинцовистой бронзы марки БрС30, состоящая из светлых зерен α -фазы (фактически меди) и темных зерен эвтектики (фактически свинца). Свинцовистые бронзы являются высококачественными антифрикционными материалами и применяются для изготовления опорных и шатунных подшипников мощных турбин, авиационных моторов, дизелей и других машин.

2.3. Микроструктура сплавов на основе магния

Микроструктура магниевых сплавов в равновесном состоянии определяется соответствующими диаграммами состояния. В качестве примера на рисунке 13 приведена микроструктура сплава МЛ5, содержащего помимо магния 8%Al; 0,8%Zn и 0,3%Mn. Алюминий и цинк введены в сплав для упрочнения, а марганец - для повышения коррозионной стойкости.

Поскольку растворимость цинка в магнии в твердом состоянии составляет не менее 1,7% и, следовательно, все количество цинка входит в твердый раствор, не присутствуя в сплаве как самостоятельная структурная составляющая, а марганцовистая фаза при используемых в работе увеличениях ввиду малого ее количества не выявляется, то микроструктура сплава марки МЛ5 может быть определена в соответствии с двойной диаграммой состояния системы Mg-Al (рисунок 14).

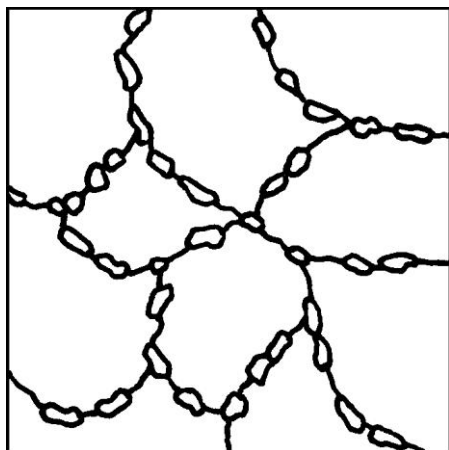


Рисунок 13 - Схема микроструктуры сплава марки МЛ5 в литом состоянии, α-фаза и γ-фаза (Mg_4Al_3). $\times 600$

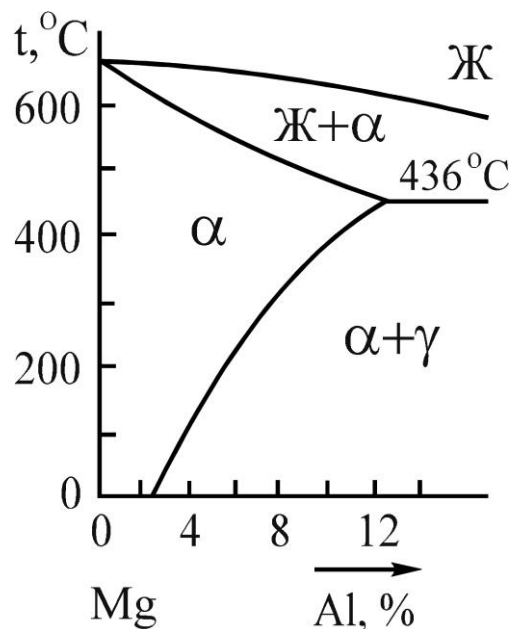


Рисунок 14 - Фрагмент диаграммы состояния системы магний – алюминий

Микроструктура сплава марки МЛ5 (см. рисунок 13) состоит из светлых зерен α-твердого раствора алюминия в магнии и более темных включений γ-фазы (соединения Mg_4Al_3), располагающихся по границам зерен α-фазы.

2.4. Микроструктура сплавов на основе олова

Микроструктура сплавов на основе олова в равновесном состоянии также может быть определена с помощью соответствующих диаграмм состояния, например, оловянистого баббита марки Б83 - с помощью тройной диаграммы состояния системы Sn-Sb-Cu. Микроструктура этого сплава в литом состоянии состоит из тройной эвтектики в виде основного темного поля α-твердого раствора сурьмы в олове и равномерно распределенных светлых мелких включений соединения $SnSb$ и Cu_6Sn_5 , светлых крупных кристаллов соединения $SnSb$ и светлых мелких кристаллов соединения Cu_6Sn_5 в виде игл или звездочек (рисунок 15).

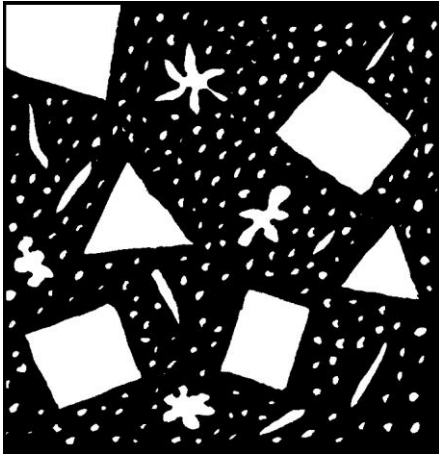


Рисунок 15 - Схема микроструктуры баббита марки Б83 в литом состоянии. SnSb, Cu_6Sn_5 и тройная эвтектика $(\alpha+SnSb+Cu_6Sn_5)$. $\times 200$

Соединение Cu_6Sn_5 кристаллизуется в первую очередь и равномерно распределяется в объеме жидкости, образуя своеобразную сетку, препятствующую ликвации по удельному весу легких кристаллов SnSb. При этом вся медь, находящаяся в сплаве, расходуется на образование соединения SnSb.

Мягкая, пластичная основа в виде тройной эвтектики и твердые включения соединений SnSb и Cu_6Sn_5 обеспечивают высокий уровень антифрикционных свойств и применяются для заливки подшипников газовых турбин, турбокомпрессоров, турбонасосов и др.

3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 3.1. Уясните цель работы.
- 3.2. Изучите классификацию, характеристику и особенности формирования структуры цветных сплавов в условиях равновесия.
- 3.3. Изучите микроструктуру цветных сплавов.
- 3.4. Изобразите схемы микроструктур изученных цветных сплавов.
- 3.5. Выполните микроструктурный анализ цветных сплавов.
- 3.6. Проследите, используя диаграмму, за формированием структуры одного из сплавов при охлаждении из жидкого состояния.
- 3.7. Составьте отчет о работе.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- Цель работы.
- Классификация и краткая характеристика изученных сплавов.
- Схемы микроструктур цветных сплавов.
- Микроструктурный анализ цветных сплавов.
- Схемы вероятных микроструктур в процессе охлаждения из жидкого состояния одного из цветных сплавов.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1. По какому принципу цветные сплавы делят на литейные и деформируемые?
- 2. Какие сплавы называются дуралюминами, какие - силуминами?
- 3. В чем заключается модифицирование силумина, какое изменение в структуре и свойствах

оно вызывает?

- 4. Какие сплавы называются латунями, какие бронзами?
- 5. В чем различие по составу, структуре и свойствам однофазных и двухфазных латуней?
- 6. Каково влияние олова на структуру и свойства оловянистых бронз?
- 7. Какой состав, структуру и свойства имеет свинцовистая бронза марки БрСЗО?
- 8. Какие легирующие элементы используются в магниевых сплавах?
- 9. Каковы требования, предъявляемые к антифрикционным материалам? Какова структура баббита марки Б83?
- 10. Каковы принципы маркировки цветных сплавов?

РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуляев А. П. Металловедение.- М.: Металлургия, 1986. - 544 с.
2. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов.- М.: Металлургия, 1984. 360 с.
3. Материаловедение/ Арзамасов Б.Н., Сидорин И.И., Косолапов Г.Ф. и др.- М.: Машиностроение, 1986. - 384 с.
4. Геллер Ю.А., Рахштадт А. Г. Материаловедение.- М.: Металлургия, 1986. - 456 с.

Лабораторно-практическое занятие № 3, 4

РАСЧЕТ КОМПОЗИЦИОННОГО МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ САМОСМАЗЫВАЮЩИХСЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: приобретение навыков расчета подшипников скольжения с композиционным полимерным самосмазывающимся покрытием; выполнение индивидуального расчетного задания.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Металлополимерные подшипники скольжения с композиционным самосмазывающимся покрытием предназначены для относительно низких скоростей скольжения (до $0,4 \text{ м/с}$) и высоких контактных напряжений (до 250 МПа).

Покрытие представляет собой композит толщиной $0,2-0,8 \text{ мм}$, состоящий из армирующей компоненты в виде специальной технической ткани из полимерных волокон и непрерывной фазы-матрицы, представляющей собой фенолкаучуковое связующее. Закрепление покрытия на субстрате (подложке) производится матричным связующим.

Армирующая компонента покрытия (см. рис.) представляет собой полуторослойную ткань атласного переплетения, у которой на рабочую лицевую поверхность выведено 100% фторопластовых волокон «полифен» а на изнанку, приклеиваемую к субстрату - до 80% полиимидных волокон «аримидТ».

Фторопласт выполняет трибофункции, полиимид - прочностные.

Полимерные материалы весьма чувствительны к температурному воздействию, поэтому расчет начинается с определения температуры.

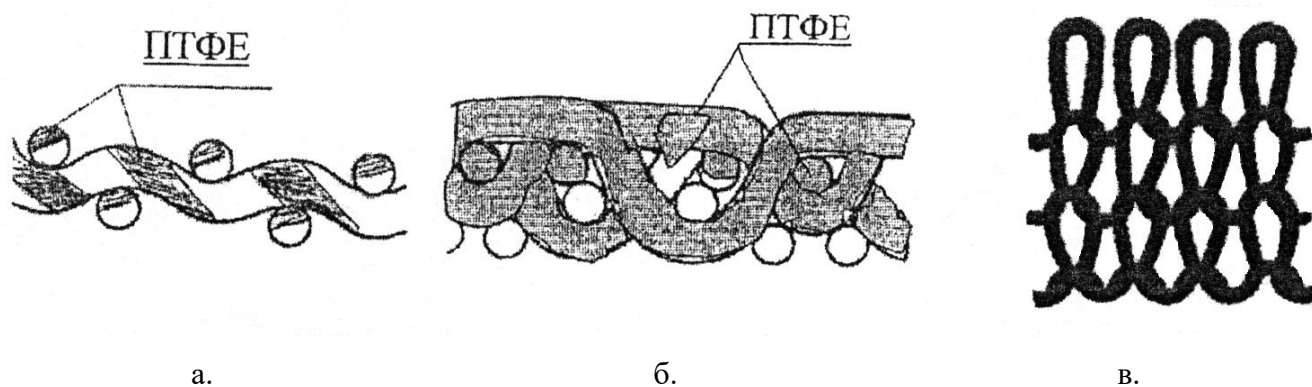


Рисунок 1 – Армирующий каркас композиционного покрытия подшипника: а – однослойная ткань; б – полутораслойная ткань; в – кулирный трикотаж

Для справок: полиамид – высокопрочный синтетический полимер $[-\text{CO}-\text{NH}-]_n$; фторопласт – эластичный линейный полимер с плотностью $\rho = 2,2 \text{ г/см}^3$; ПТФЕ – политетрафторэтилен (полифен) $[-\text{CF}_2-\text{CF}_2-]_n$; фенол – $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$; каучук – $[-\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)=\text{CHCH}_2-]_n$.

1. ОСВОЕНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

Методика расчета и примеры её выполнения имеются в отдельном методическом руководстве. В настоящем сборнике исходные данные, расчетные формулы, примеры расчета и их иллюстрации в виде графиков представлены в виде окон программы MathCAD. Программа может быть использована преподавателем для проверки расчетных заданий студентов или самими студентами (с ведома преподавателя) в случае затруднений при расчетах.

1. Исходные данные.

$\delta := 0.4 \cdot 10^{-3}$ - толщина покрытия, м

$t_c := 20$ - окружающая температура, °C

$h := 0.4 \cdot 10^{-3}$ - допустимый износ подшипника, м

$K_t := 0.75$ - коэффициент неравномерности нагрева

$\alpha := 7$ - средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·K)

Параметры материала стальной втулки и вала:

$\rho_1 := 7850$ - плотность, кг/м³

$C_1 := 400$ - удельная теплоемкость, Дж/(кг·K)

$\lambda_1 := 50$ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·K)

Параметры материала покрытия:

$\rho := 1350$ - плотность, кг/м³

$C := 1500$ - удельная теплоемкость, Дж/(кг·K)

$\lambda := 0.20$ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·K)

$\Delta_2 := 0.04 \cdot 10^{-3}$ - монтажный зазор в подшипнике, м

Индивидуальные исходные данные (задание для расчета):

$d := 35 \cdot 10^{-3}$ - внутренний диаметр втулки подшипника, м

$b := 40 \cdot 10^{-3}$ - ширина втулки подшипника, м

$P := 20000$ - нагрузка на подшипник, Н

$n := 120$ - частота вращения подшипника, 1/мин.

Mathcad Professional - [Лаб_Раб по МКМиП_Подшипник]

Файл Правка Вид Вставка Формат Математика Символьная математика Окна Помощь

Normal Arial 10 B I U

2. Расчет.

$D := 1.3 \cdot d$ - наружный диаметр подшипниковой втулки, м

$F := 3.14 \cdot D \cdot b$ - площадь наружной поверхности подшипниковой втулки (площадью торцов пренебрегаем), м²

$V := 3.14 \cdot d \cdot \frac{n}{60}$ - скорость скольжения, м/с

$\beta := 1 - \frac{\sqrt{\lambda_1 \cdot C_1 \cdot \rho_1}}{\sqrt{\lambda \cdot C \cdot \rho} + \sqrt{\lambda_1 \cdot C_1 \cdot \rho_1}}$ - коэффициент распределения тепловых потоков (для потока, идущего через полимер)

Принимаем коэффициент трения: $f := 0.03$

$Q := \beta \cdot f \cdot P \cdot V$ - количество генерируемого тепла, Вт

$t_0 := t_c + Q \cdot \left[\frac{1}{(2 \cdot 3.14 \cdot b) \left(2 \cdot \frac{\delta}{\lambda \cdot d} + \frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \left(\frac{D}{d + 2 \cdot \delta} \right) \right)} + \frac{1}{\alpha \cdot K \cdot F} \right]$ - температура в зоне трения, °C

$D = 0.046 \quad F = 5.715 \times 10^{-3} \quad V = 0.22 \quad \beta = 0.048 \quad Q = 6.374$

$t_0 = 235.483$ - если t_0 превышает 250°C, то необходимо увеличить ширину подшипника "b"

Исследование пределов изменения исходных данных d, b, P, n для получения значения температуры $t_0 < 250^\circ\text{C}$ (при расчетах эту часть можно пропустить!)

$t_{00}(d, b, P, n) := t_c + \beta \cdot f \cdot P \cdot \left(3.14 \cdot d \cdot \frac{n}{60} \right) \cdot \left[\frac{1}{(2 \cdot 3.14 \cdot b) \left(2 \cdot \frac{\delta}{\lambda \cdot d} + \frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \left(\frac{D}{d + 2 \cdot \delta} \right) \right)} + \frac{1}{\alpha \cdot K \cdot F \cdot [3.14 \cdot (1.3 \cdot d) \cdot b]} \right]$

$d := 30 \cdot 10^{-3} \quad b := 30 \cdot 10^{-3} \quad P := 20000 \quad n := 100$

$d_1 := 20 \cdot 10^{-3}, 21 \cdot 10^{-3} \dots 60 \cdot 10^{-3} \quad b_1 := 20 \cdot 10^{-3}, 21 \cdot 10^{-3} \dots 60 \cdot 10^{-3} \quad P_1 := 10000 \dots 65000 \quad n_1 := 50 \dots 300$

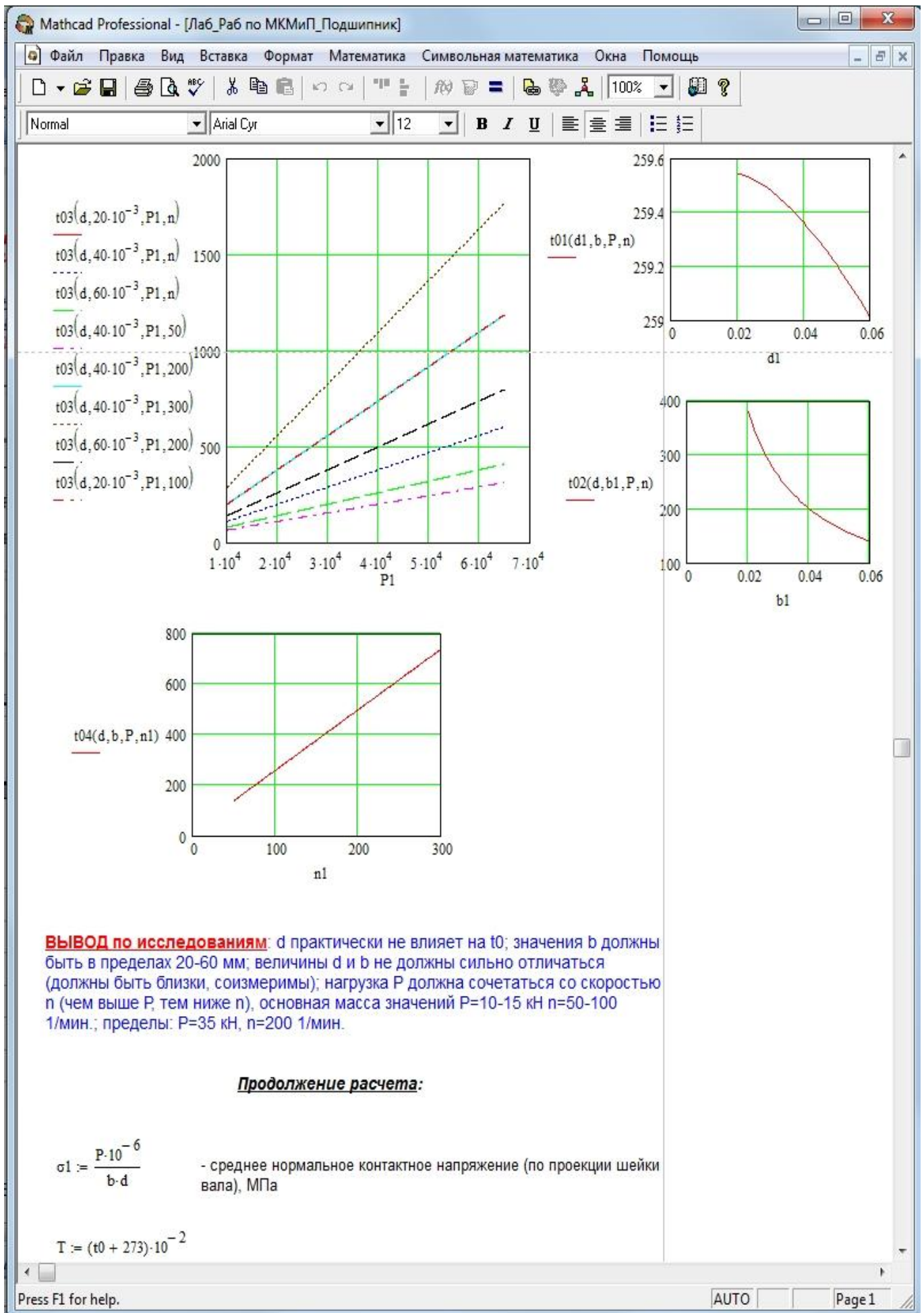
$t_{01}(d_1, b, P, n) := t_{00}(d_1, b, P, n)$

$t_{02}(d, b_1, P, n) := t_{00}(d, b_1, P, n)$

$t_{03}(d, b, P_1, n) := t_{00}(d, b, P_1, n)$

$t_{04}(d, b, P, n_1) := t_{00}(d, b, P, n_1)$

Press F1 for help. AUTO Page 1



Mathcad Professional - [Лаб_Раб по МКМиП_Подшипник]

Файл Правка Вид Вставка Формат Математика Символьная математика Окна Помощь

Normal Arial 10 B I U

$\delta_1 := 0.024 \cdot \sigma_1^{0.295} \cdot \left(\frac{\Delta_2}{2}\right)^{0.027} \cdot 1.4^T$ - абсолютная деформация ползучести в диаметральном сечении вала, мм
 $\phi_0 := \arccos\left(\frac{0.5 \cdot \Delta_2}{0.5 \cdot \Delta_2 + \delta_1}\right)$ - полуугол дуги контакта вал-подшипник
 $\sigma_2 := \frac{P \cdot 10^{-6}}{b \cdot d \cdot \phi_0}$ - средние нормальные контактные напряжения (по дуге контакта), МПа
 $E := 10.57 \cdot 1.003^{-T} \cdot \sigma_2^{1.02-0.02 \cdot T}$ - установившийся радиальный модуль покрытия, МПа
 $\sigma_{bb} := 1137.4 - 217.16 \cdot T$ - несущая способность покрытия, т.е. напряжения, вызывающие при данной температуре вынужденную высокоэластичность покрытия, МПа
 $\psi_{rad} := \frac{2 \cdot (\sigma_{bb} - \sigma_2) \cdot \delta}{b \cdot E}$ - допустимый угол перегиба вала в подшипниках, в радианах и градусах
 $\psi_{grad} := \frac{180 \cdot \psi_{rad}}{3.14}$
 $f_1 := 12.27 \cdot \sigma_2^{-0.722} \cdot T^{-2.691}$ - коэффициент трения (реальный); если f_1 отличается от ранее принятого f более, чем на 50%, то следует пересчитать все величины (кроме σ_1), начиная с t_0 (!)
 $f_1 = 0.023 \quad f = 0.03 \quad ff := \frac{f - f_1}{f} \quad ff = 24.084 \%$
 $J := 9.36 \cdot 10^{-14} \cdot \sigma_2^{2.61} \cdot V^{1.41} \cdot e^{1.79 \cdot T}$ - интенсивность изнашивания (размерность???)
 $R := 91955.6 \cdot 10^6 \cdot \sigma_2^{-2.51} \cdot V^{0.136 \cdot \log(\sigma_2) - 2.75} \cdot e^{-1.88 \cdot T}$ - ресурс всего покрытия, циклов нагружения
 $R_p := \frac{h \cdot R}{60 \cdot \delta \cdot n}$ - ресурс подшипника, часов
 $\sigma_1 = 22.222 \quad T = 5.085 \quad \delta_1 = 0.248 \quad \phi_0 = 1.571 \quad \sigma_2 = 14.148$
 $E = 118.616 \quad \sigma_{bb} = 33.178 \quad \psi_{rad} = 4.278 \times 10^{-3} \quad \psi_{grad} = 0.245$
 $f_1 = 0.023 \quad J = 9.994 \times 10^{-8} \quad R = 4.267 \times 10^5 \quad R_p = 71.124$

Вывод: подшипник обеспечивает при принятых эксплуатационных режимах непрерывную работу в течение **R** циклов нагружения и **R_p** часов.

Press F1 for help. AUTO

2. ВЫПОЛНЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАСЧЕТА ПО ИНДИВИДУАЛЬНЫМ ЗАДАНИЯМ

Варианты индивидуальных заданий

№ п/п	Диаметр d, мм	Ширина b, мм	Нагрузка Р, кН	Частота вращения n, об/с мин⁻¹
1	20	25	25	100 (50)
2				200 (70)
3				300 (100)
4			50	120 (60)
5				220 (80)
6				320 (110)
7	30	30	30	100 (50)
8				200 (80)
9				300 (120)
10			55	120 (100)
11				220 (120)
12				320 (150)
13		30	35	70 (50)
14				150 (70)
15				230 (110)
16			60	80 (80)
17				170 (100)
18				250 (150)
19	40	40	35	50 (50)
20				100 (70)
21				150 (100)
22			60	60 (80)
23				110 (100)
24				160 (120)
25		45	40	50 (50)
26				100 (60)
27				150 (70)
28			65	60 (100)
29				110 (150)
30				160 (200)

Лабораторная работа №5

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ (ПРИ МАГНЕТРОННОМ ИСПАРЕНИИ)

ЦЕЛИ РАБОТЫ: знакомство с устройством и работой ионно-плазменной установки для нанесения покрытий в вакууме TINA 900; проведение тестового процесса по нанесению покрытия на экспериментальные образцы.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Вакуумное напыление представляет группу способов получения тонких пленок и покрытий, в которых атомарный поток осаждаемого вещества создается с помощью физических процессов испарения материалов в вакууме или распыления атомов поверхности исходного материала в результате бомбардировки ускоренными ионами или нейтральными атомами. Напыление осуществляется в вакуумной камере, в которой с помощью средств вакуумирования достигается и непрерывно поддерживается необходимое давление. Величина устанавливаемого давления определяется физикой и техникой процесса и находится в интервале от $10^{-4} \div 1$ Па.

Поток испаренных или распыленных атомов, сталкиваясь с поверхностью твердого тела, адсорбируется и конденсируется на ней, образуя, в зависимости от условий, покрытие с определенными свойствами и структурой.

Вакуумное напыление можно разбить на три последовательно протекающие стадии: преобразование исходного напыляемого материала в парообразный поток испаренных (распыленных) атомов; распространение потока пара в направлении поверхности напыления; взаимодействие атомарного потока с твердой поверхностью, конденсация и формирование покрытия.

Характеристика установки TINA 900 для нанесения покрытий в вакууме. По способу напыления она относится к установкам термо-ионного осаждения с электродуговым или магнетронным испарителем. Наиболее перспективной и производительной является система распыления, состоящая из нескольких магнетронов. Рассматриваемая в настоящей работе установка TINA 900 имеет двухмагнетронный распылитель исходного материала и позволяет наносить покрытия из нитридов, карбидов и карбонитридов различных исходных металлов, таких как: титан, цирконий, хром и др.

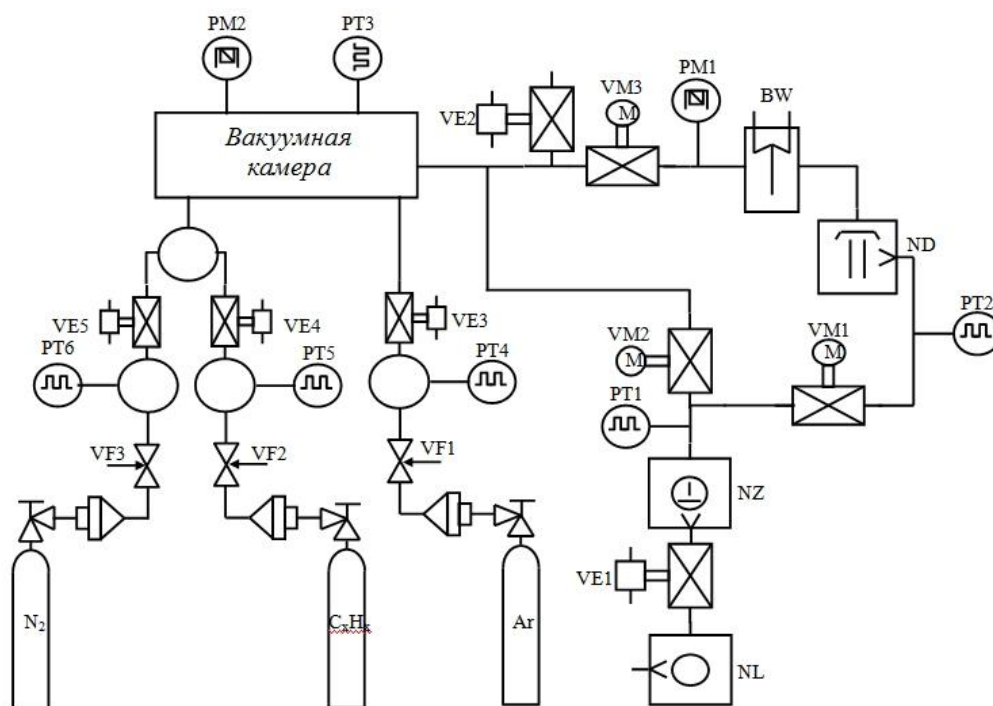


Рисунок 1 - Вакуумная схема установки для нанесения покрытий:

NL - форвакуумный насос; NZ - двухроторный насос; ND - диффузионный насос; VM1÷VM3 - электромеханические затворы; VE1÷VE5 – электромагнитные клапана; BW - водоохлаждаемая ловушка; VF1÷VF3 - напекатели; PM1, PM2 - магниторазрядные датчики давления; PT1÷PT6 - термпарные датчики давления

В состав установки входят: вакуумная камера диаметром 900 мм и высотой 880 мм; насосный стенд с тремя вакуумными насосами; магнетронная распылительная; система напуска газов; управляющая ЭВМ S 2000R с блоками автоматики и система водяного охлаждения. Вакуумная схема установки показана на рисунке 1. На рисунке 2 изображена система магнетронного распыления.

Вакуумный пост установки, состоящий из форвакуумного, двухроторного и диффузионного насосов, обеспечивает остаточное давление в вакуумной камере менее 10^{-4} Па. Рабочее давление при напылении составляет примерно 0.2 Па. Изделия крепятся в вакуумной камере к вращающемуся планетарному механизму, что обеспечивает равномерное нанесение покрытий. Максимальная масса разовой загрузки камеры составляет 50 кг. Мощность электродугового испарителя установки может изменяться от 4.5 до 12.3 кВт. При этом, величина тока дуги, создаваемой в среде аргона, может изменяться от 115 до 300 А.

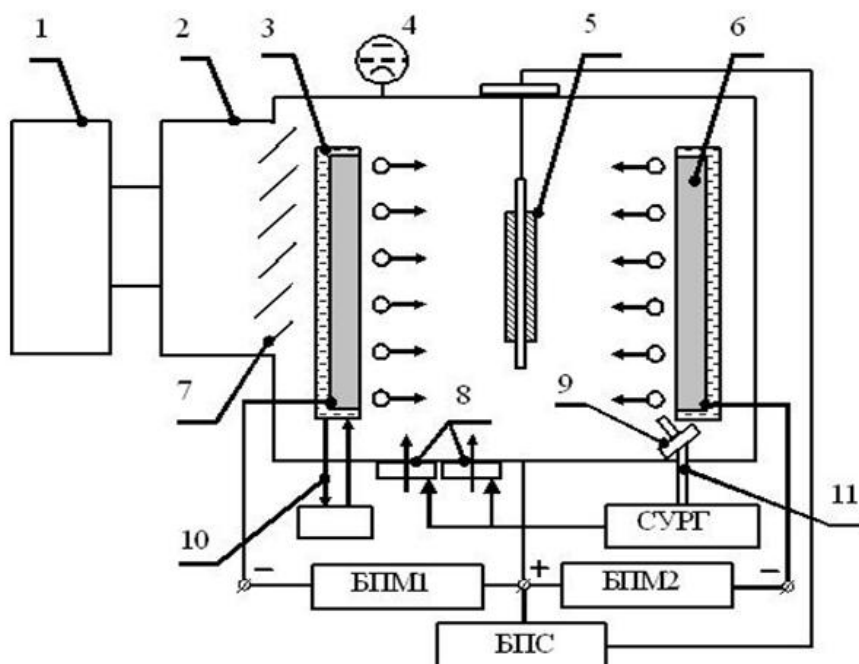


Рисунок 2 - Схема магнетронной распылительной системы:

1-вакуумная система; 2- вакуумная камера; 3- охладитель мишени магнетрона; 4- ионизационный датчик давления; 5- поверхность конденсации; 6- магнетрон (распыляемая мишень); 7- экран; 8- нате-катели газа; 9- крепление световода; 10- система охлаждения; 11- свето-проводящий кабель; БПМ- блок питания магнетронов; БПС- блок питания смещения; СУРГ- система управления расходом газов

Максимальная мощность магнетронной распылительной системы 30 кВт.

Установка имеет две независимые линии подачи реакционных газов в вакуумную камеру (например, азот и ацетилен), что позволяет в одном процессе напыления формировать многослойные, различающиеся по химическому составу и толщине покрытия.

Весь процесс формирования покрытия в установке можно разделить на три стадии (таблица 1): предварительный нагрев изделий, ионная очистка поверхности и непосредственно формирование покрытия.

При предварительном нагреве происходит равномерный прогрев вращающегося планетарного механизма и изделий, стенок вакуумной камеры, что приводит к удалению с их поверхностей адсорбированных (сконденсированных) молекул остаточных газов (в первую очередь паров воды).

Стадия ионной очистки поверхности проходит при подаче на изделия отрицательного напряжения до 1200 V, что вызывает интенсивное распыление и удаление с поверхности различных загрязнений, которые не удастся очистить при предварительной подготовке изделий.

На третьей стадии с помощью блоков питания БПМ1 и БПМ2 происходит подача отрицательного напряжения (400÷500 V) на мишени магнетронов вызывая тем самым их

интенсивное распыление. Одновременно с этим в вакуумную камеру может подаваться реакционный газ или смесь газов, и происходит формирование покрытия определенного состава. Мощность, подаваемая на магнетроны, может варьироваться от 4 до 15 кВт.

Таблица 1 – Параметры стадий формирования покрытий

Стадия процесса	Мощность магнетрона, кВт	Напряжение на изделии, V	Давление в камере, Па
Предварительный нагрев	0	0	0.1÷0.5
Ионная очистка	0.3÷0.5	1200	0.15÷0.3
Формирование покрытия	4÷15	50÷70	0.15÷0.2

СОДЕРЖАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с общими принципами формирования покрытий в вакууме, оборудованием для получения покрытий и конструкцией его основных узлов.
2. Подготовить образцы (изделия) для формирования покрытий.
3. Под руководством преподавателя выполнить технологический процесс получения покрытия. Во время проведения процесса нанесения покрытия контролировать и записывать в протокол эксперимента следующие параметры: время процесса, показания датчиков температуры, давление в вакуумной камере.
4. Представить протокол с экспериментальными данными преподавателю и получить задание для выполнения расчетной части работы.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ ЧАСТИ

В условиях высокого вакуума тепловой поток Q , подводимый (отводимый) к какому-либо предмету включает в себя следующие составляющие:

$$Q = Q_{\text{изл}} + Q_{\text{ог}} + Q_{\text{конд}} + Q_{\text{тепл}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{изл}}$ – результирующий тепловой поток излучения; $Q_{\text{ог}}$ – тепловой поток, обусловленный теплопроводностью остаточного газа; $Q_{\text{конд}}$ – результирующий тепловой поток процессов конденсации (сублимации) адсорбции (десорбции), происходящих на поверхности; $Q_{\text{тепл}}$ – тепловой поток, вызванный теплопроводностью элементов крепления. При выполнении расчетов величинами $Q_{\text{ог}}$ и $Q_{\text{тепл}}$ можно пренебречь.

Определение величин $Q_{\text{изл}}$ и $Q_{\text{конд}}$ предлагается провести исходя из расчетной схемы, изображенной на рисунке 3.

Рассматривается замкнутая система тел с известными геометрическими размерами и характеристиками поверхностей:

1 - Магнетрон – источник молекулярного и теплового потока:

мишень магнетрона - длина 640 мм, ширина 100 мм;
 коэффициент лучепоглощения (степень черноты) - $\varepsilon_1=1$;
 температура поверхности T_1 принимается равной 400 К;
 расстояние между магнетронами – 300 мм.

2 – Экспериментальный образец, или какой-либо другой объект:

геометрические размеры, материал, масса, расположение в вакуумной камере задаются преподавателем;
 коэффициент лучепоглощения (степень черноты) - $\varepsilon_2=1$;
 температура объекта T_2 [К] измеряется в процессе выполнения экспериментальной части работы и является искомой величиной зависящей от времени.

3 – Вакуумная камера:

цилиндр $\varnothing 900$ мм, $h=880$ мм;
 коэффициент лучепоглощения (степень черноты) - $\varepsilon_3=1$;
 температуру внутренних стенок камеры T_3 принять равной 320 К (предполагается, что она не изменяется в процессе эксперимента).

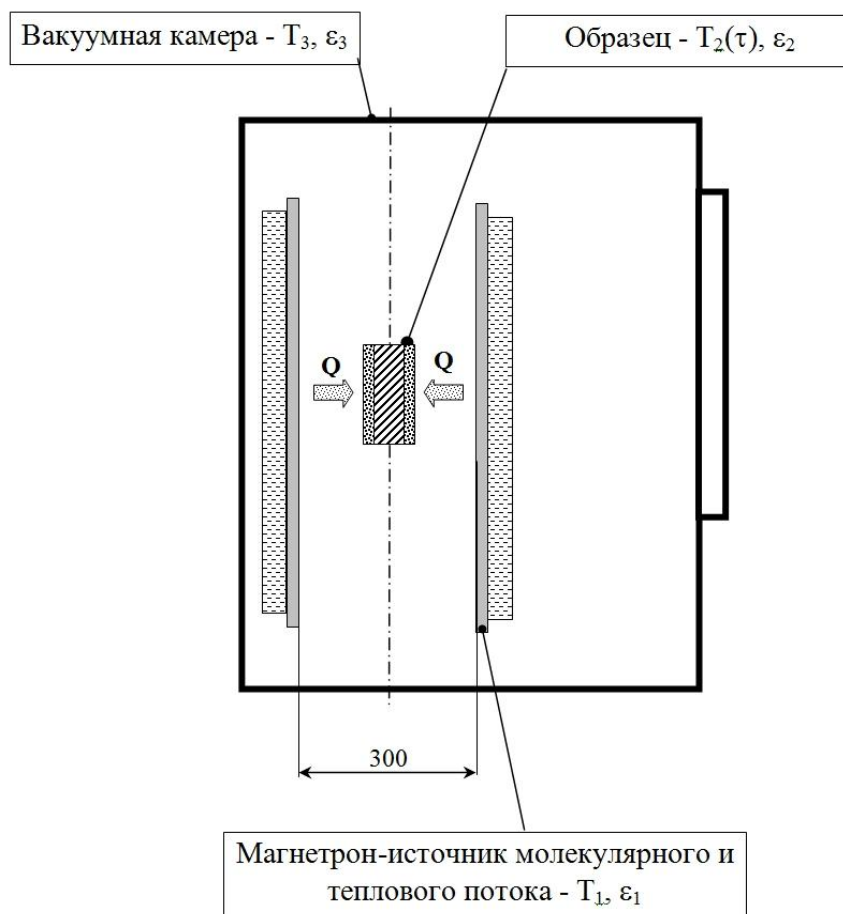


Рисунок 3 - Расчетная схема для определения тепловых потоков
 в вакуумной системе

Определение величины $Q_{\text{конд}}$

В общем случае искомый тепловой поток, обусловленный процессами конденсации (сублимации) распыляемого с мишени магнетрона вещества (титана) может быть рассчитан следующим образом:

$$Q_{\text{конд}} = G_{\text{Ti}} \cdot r \cdot \varphi_{12}, \quad (2)$$

где r – теплота фазового перехода, Дж/кг; φ_{12} – угловой коэффициент, определяемый из взаимного расположения и геометрических размеров тел 1 и 2. Предполагается, что распыление материала мишени подчиняется диффузному закону. Величина G_{Ti} [кг/с] – скорость распыления мишени – зависит от мощности, подаваемой на магнетрон.

В рамках настоящей работы для определения величины $Q_{\text{конд}}$ предлагается воспользоваться следующим соотношением:

$$Q_{\text{конд}} = V_{\text{Ti}} / \rho_{\text{Ti}} \cdot r \cdot F_{\text{изд}} \quad (3)$$

Здесь V_{Ti} – удельная скорость роста покрытия, м/с; ρ_{Ti} – плотность материала мишени (титана), кг/м³; $F_{\text{изд}}$ – площадь изделия, м². Значение V_{Ti} задается преподавателем.

Расчет лучистого теплообмена в вакуумной камере

Изучение методов расчета лучистого теплообмена в сложных вакуумных системах является основной задачей лабораторной работы. В данной работе расчет тепловых потоков излучением целесообразно выполнить с помощью зонального метода, применяемого в тех случаях, когда некоторая замкнутая система может быть условно разделена на несколько участков (зон) с одинаковой, в пределах каждой зоны, температурой и коэффициентами лучепоглощения.

Каждый отдельный участок системы характеризуется несколькими тепловыми потоками излучения (рисунок 4):

- 1 - Собственным ($Q_{\text{соб}}$, Вт), зависящим от температуры T [К] поверхности;
- 2 - Падающим ($Q_{\text{пад}}$, Вт), тепловым потоком, поступающим на поверхность со стороны других поверхностей системы;
- 3 - Отраженным ($Q_{\text{отр}}$, Вт), связанным с отражательной способностью поверхности;
- 4 - Поглощенным ($Q_{\text{погл}}$, Вт), зависящим от поглощательной способности поверхности.

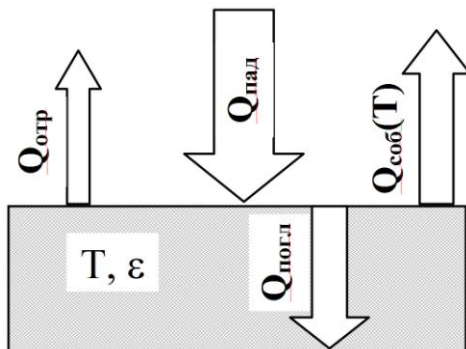


Рисунок 4 – Схема распределения тепловых потоков излучением

Поток лучистой энергии, исходящий с поверхности ($Q_{исх}$, Вт/м²), согласно рисунку 4 определится следующим образом:

$$Q_{исх} = Q_{соб} + Q_{отр}, \quad (4)$$

или, принимая во внимание свойства поверхности:

$$Q_{исх} = Q_{соб} + (1-\varepsilon) \cdot Q_{пад}. \quad (5)$$

Наряду с термином «исходящее» в литературе иногда встречается термин «эффективное» ($Q_{эфф}$).

Если теперь перейти к системе тел, то поток, падающий на поверхность i , состоит из суммы потоков, исходящих с остальных тел системы, то есть:

$$Q_{пад,i} = \sum_{j=1}^N Q_{исх,j} \cdot \varphi_{ji} \quad (6)$$

где φ_{ji} также, как и раньше, угловой коэффициент, определяющий долю теплового потока, падающего с поверхности j на поверхность i . Таким образом, с учетом (6) для $Q_{исх,i}$ получим:

$$Q_{исх,i} = Q_{соб,i} + (1 - \varepsilon_i) \cdot \sum_{j=1}^N Q_{исх,j} \cdot \varphi_{ji} \quad (7)$$

Для замкнутой системы тел, состоящей из n поверхностей, на основе (5.7) можно получить n алгебраических уравнений, совместное решение которых позволяет определить все значения $Q_{исх,i}$. Тогда результирующий тепловой поток излучением на поверхность i ($Q_{исх,i}$, Вт) можно определить как:

$$Q_{рез,i} = \varepsilon_i \cdot \sum_{j=1}^N Q_{исх,j} \cdot \varphi_{ji} - Q_{соб,i} \quad (8)$$

Задание на расчетную часть работы

1. Составить расчетную схему и определить все необходимые геометрические размеры для проведения расчетов тепловых потоков излучением.
2. Согласно расчетной схеме записать систему уравнений лучистого теплообмена в общем виде.
3. Записать систему уравнений лучистого теплообмена с учетом принятых допущений. Решить систему.
4. Составить уравнение для результирующего теплового потока излучением для изделия (образца). Определить все необходимые угловые коэффициенты.
5. Определить величину $Q_{конд}$.
6. Решить нестационарное уравнение (1) относительно температуры изделия – построить теоретическую зависимость изменения температуры от времени, провести сравнение с

результатами экспериментов. Сделать выводы о справедливости расчетной модели и принятых допущениях.

Для определения угловых коэффициентов можно воспользоваться их основными свойствами, расчетными выражениями или графиками (таблицами), приведенными в работе: Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 431 с. (разделы 7.1-7.3, приложения).

Лабораторная работа №6

МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

ЦЕЛИ РАБОТЫ: изучение микроструктуры покрытий, полученных способом ионно-плазменного напыления; знакомство с конструкцией и принципом действия автоматизированной установки для проведения испытаний механических свойств покрытий методом непрерывного вдавливания индентора; освоение методики и определение трещиностойкости покрытий экспериментальных образцов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

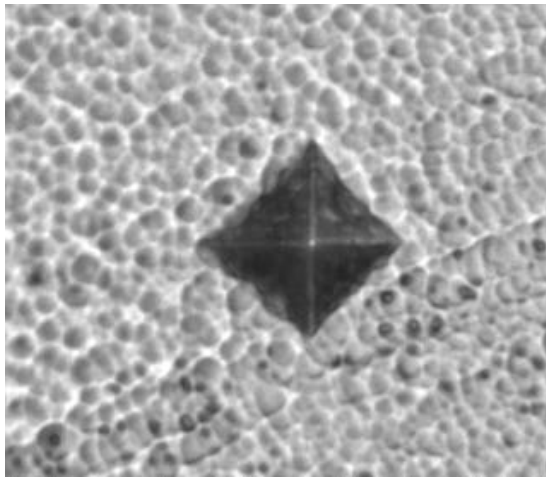
Одной из самых распространённых количественных характеристик трещиностойкости материалов является критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} . Согласно ГОСТ 25506-85 для определения K_{Ic} требуются специальные образцы с предварительно выращенной усталостной трещиной. Толщина образцов должна обеспечивать условие плоской деформации в вершине трещины при нагружении образца. Однако из тонких покрытий очень сложно изготовить такие образцы, и поэтому стали разрабатываться способы определения K_{Ic} методом индентирования. В настоящее время существуют различные методики и формулы для определения K_{Ic} индентированием пирамидой Виккерса. Чаще всего используется методика Эванса, согласно которой K_{Ic} рассчитывается по следующей зависимости:

$$K_{Ic} = A \cdot HV \cdot a^{1/2} (E / HV)^{1/2} (c / a)^{-B} \quad (1)$$

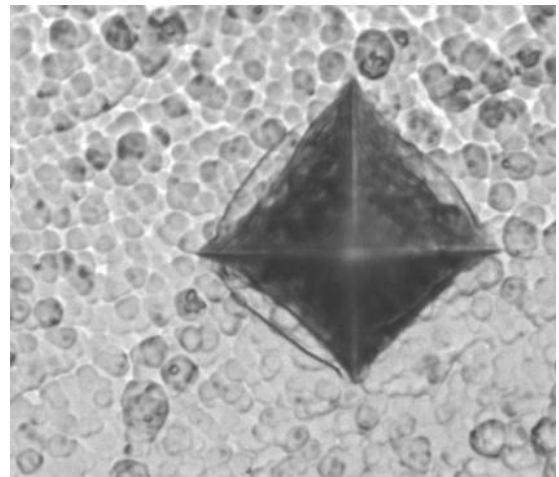
где HV – твёрдость по Виккерсу; a – полудиagonalь отпечатка; c – длина радиальной трещины; E – модуль нормальной упругости; A и B – эмпирические коэффициенты.

Следует отметить, что методика Эванса применима для случая образования на поверхности радиальных трещин в углах отпечатка, полученного вдавливанием пирамиды. Однако, испытания нанокомпозиционных ионно-плазменных покрытий показывают, что при индентировании пирамидой образуются не радиальные, а кольцевые трещины. Первая кольцевая трещина, расположенная вокруг отпечатка, образуется при некоторой критической нагрузке $F_{кр}$.

На рисунке 1 представлены фотографии, иллюстрирующие образование кольцевых трещин в нанокпозиционном покрытии нитридной системы TiN/Zr(Nb)N.



а.



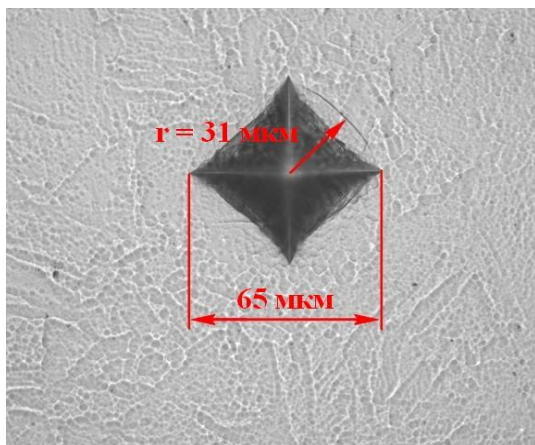
б.

Рисунок 1 – Микрофотография отпечатков на покрытии системы TiN/Zr(Nb)N при разных нагрузках индентирования (x500): а – 100 Г; б – 200 Г

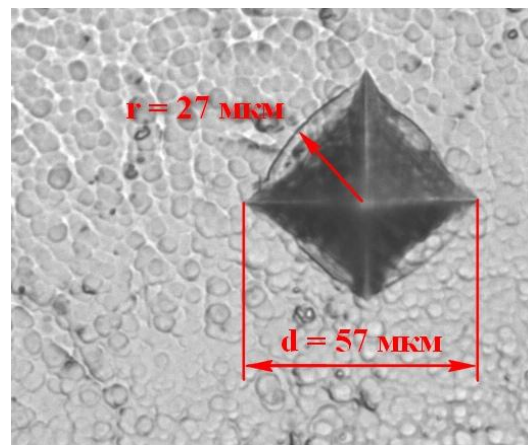
В зависимости от режимов нанесения покрытий и их твёрдости критическая нагрузка $F_{кр}$ различается. Для определения $F_{кр}$ необходимо вдавливать пирамиду с постепенно увеличивающейся нагрузкой и наблюдением за отпечатком при помощи микроскопа на каждой ступени нагружения и разгрузки. Располагая значением $F_{кр}$, можно использовать его для качественной оценки трещиностойкости покрытий; чем выше $F_{кр}$, тем выше трещиностойкость. При такой оценке данные покрытия можно расположить в один ряд по степени уменьшения $F_{кр}$, а следовательно, и трещиностойкости.

Однако, методика оценки трещиностойкости по $F_{кр}$ трудоёмка, и не всегда удаётся точно зафиксировать образование первой кольцевой трещины и соответствующую нагрузку $F_{кр}$. В связи с этим, предлагается использовать для оценки трещиностойкости радиус кольцевой трещины r , которая образуется при нагрузке $F'_{кр} = \text{const}$, гарантирующей образование кольцевой трещины для данного класса покрытий. Нагрузку $F'_{кр}$ можно установить предварительными испытаниями покрытий индентированием. Основным переменным параметром в этом случае является r , при этом, чем больше r , тем меньше трещиностойкость покрытия. Однако, может случиться так, что при $F'_{кр} = \text{const}$ для двух покрытий окажется одинаковая диагональ отпечатка d , а следовательно, и твёрдость HV. И в этом случае при большем r трещиностойкость покрытия будет ниже.

На рисунке 2 представлена схема определения радиуса кольцевой трещины.



а.



б.

Рисунок 2 – Схема определения радиуса кольцевой трещины

Количественная оценка трещиностойкости покрытий индентированием возможна после проведения предварительных испытаний на трещиностойкость стандартизованным методом и на твёрдость с определением HV в некотором интервале нагрузок. После чего необходимо построение графика «нормализованная трещиностойкость $\left[K_{Ic} / (HV \cdot a^{1/2}) \right] \cdot (HV / E)^{1/2}$ – нормализованный радиус кольцевой трещины r/a ». Для этого при практической реализации методики необходимы несколько образцов с однотипным покрытием и различным уровнем твердости и трещиностойкости.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБОРУДОВАНИЯ

Испытания непрерывного индентирования могут быть проведены на любом оборудовании, предназначенном для этой цели и имеющем достаточно большой интервал нагрузок. Последнее условие необходимо для обеспечения процесса индентирования на разных масштабных уровнях (макро-, мезо-, микроиндентирование). Для нанокomпозиционных покрытий, несмотря на их название, уровень наноиндентирования для применяемого при реализации данной методики оборудования, необязателен, так как нанометрический масштаб имеют только отдельные слои нанокomпозита, а методика определяет трещиностойкость всего покрытия, которое обычно имеет толщину нескольких микрометров.

Так, например, для выполнения работ могут быть рекомендованы имеющиеся распоряжении НОЦ «Материалы» ДГТУ: автоматизированный прибор «Buehler MicroMet 5124» (производитель «Buehler», Швейцария), представленный на рисунке 3, или измерительная платформа «NanoTest 600» (производитель «Micro Materials», Великобритания), показанная на рисунке 4.

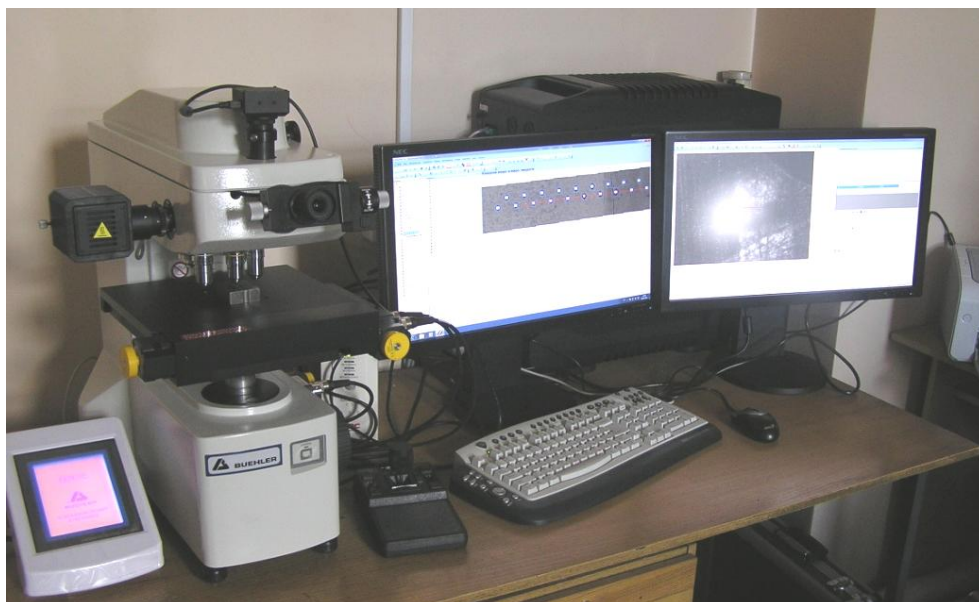


Рисунок 3 – Автоматизированный микротвердомер «Buehler MicroMet 5124»



Рисунок 4 – общий вид измерительной платформы «NanoTest 600»

Микротвердомер «Buehler MicroMet 5124» предназначен для измерения микротвердости с возможностью анализа микроструктуры металла в диапазоне нагрузок от 0,5 г до 2 кг.

Универсальный прибор для индентирования «NanoTest 600» предназначен для исследования физико-механических свойств материалов в нано- и микромасштабе. Работает по принципу индентирования методами вдавливания, царапания, удара (циклическое нагружение). Определяет модуль упругости; твердость; коэффициент трения; шероховатость поверхности; работу, затраченную на упругопластическую деформацию; податливость контакту и другие характеристики с разрешением в глубину - 0.04 нм, разрешением в горизонтальной плоскости -

0.02 мкм при диапазоне нагрузки - (0.1...500) мН. Прибор использует два типа инденторов – пирамиды Виккерса (микро- и мезоиндентирование) и Берковича (для наноиндентирования).

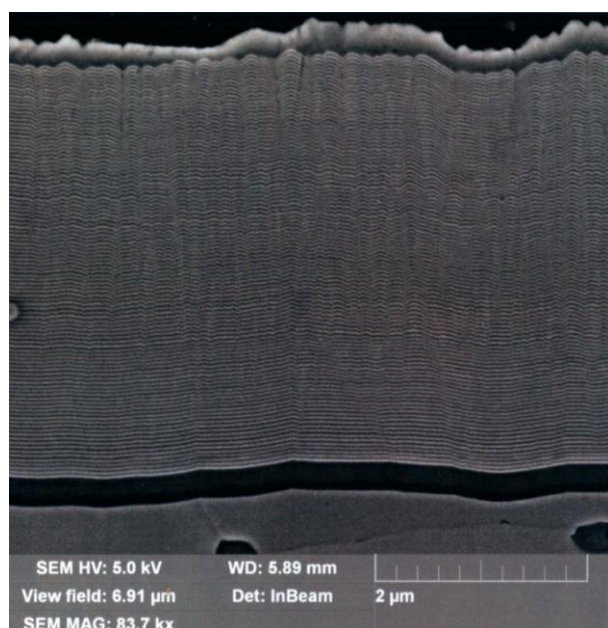
Для более конкретного разграничения масштабных уровней при индентировании составлена таблица 1. В ней приведены значения глубины t_p , диагонали отпечатка d_p при индентировании пирамидой, по которым рассчитаны объёмы отпечатков V_p . Масштабные уровни индентирования пирамидой Виккерса указаны в зависимости от V_p .

Таблица 1 – Масштабные уровни индентирования при использовании пирамиды Виккерса

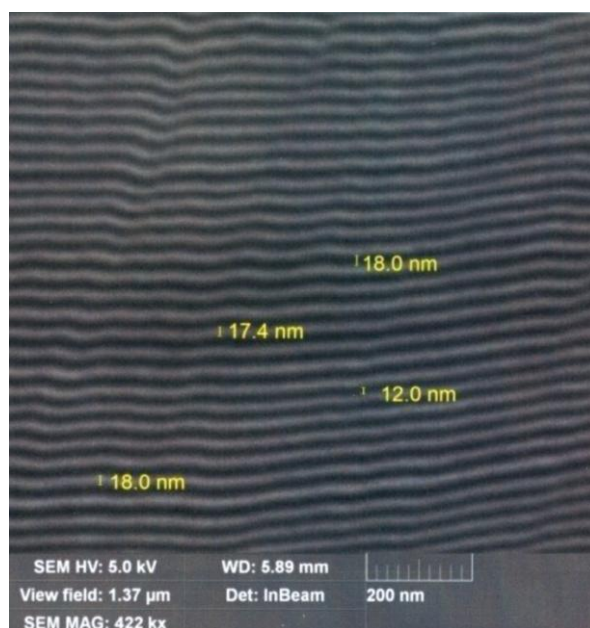
Глубина отпечатка t_p , мкм	Диагональ отпечатка d_p , мкм	Объём отпечатка V_p , мкм ³	Масштабный уровень
0.01	0.07	$8.17 \cdot 10^{-6}$	нано
0.1	0.7	$8.17 \cdot 10^{-3}$	микро
1.0	7.0	$8.17 \cdot 10^0$	микро
10	70	$8.17 \cdot 10^3$	мезо
20	140	$6.53 \cdot 10^4$	мезо
50	350	$1.02 \cdot 10^6$	макро

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проводятся на нескольких стальных образцах с нанесенными на них ионно-плазменными 2D-наноконпозиционными (слоистыми) покрытиями. Количество образцов при проведении практикума определяет преподаватель.



а.



б.

Рисунок 5 – Поперечное сечение образца со слоистым наноконпозиционным покрытием нитридной системы TiN/Zr(Nb)N: растровая электронная микроскопия при различных увеличениях (а) и (б)

В работе могут использоваться различные типы нанокomпозиционных покрытий: металлические, металлокерамические, керамические. На рисунке 5 представлено строение слоистого нанокomпозиционного покрытия нитридной (керамической) системы TiN/Zr(Nb)N.

Измерения выполняются приборами автоматически по программе, заданной преподавателем или научным сотрудником НОЦ. Задача студентов понять цели и принципы выполнения практикума, получить результаты измерений образцов, на их основе заполнить таблицы измерений 2 и 3, сделать выводы об уровне трещиностойкости нанокomпозиционных покрытий и охарактеризовать факторы, влияющие на различие уровня трещиностойкости исследованных покрытий.

Таблица 2 – Результаты измерений критической нагрузки $F_{кр}$ образования кольцевой трещины в покрытиях

№ образца	Характеристика образца и покрытия	$F_{кр}$		HV, кГ/мм ²	$t_{кр}$, мкм	Качественная* оценка трещиностойкости
		Г	Н			
1						
2						
....						
n						

Таблица 3 – Результаты измерений диагоналей d и глубин t отпечатков, твёрдости HV и радиусов кольцевых трещин r, полученных при $F'_{кр} = 500$ Г для различных образцов с покрытиями

Покрытие	d, мкм	t, мкм	HV, кГ/мм ²	r, мкм	Трещиностойкость*
1					
2					
...					
n					

* - в последней графе после выполнения всего цикла измерений проставляется сравнительная относительная характеристика трещиностойкости всех измеренных образцов (например: высокая, средняя, низкая)

Лабораторно-практическое занятие №7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПЛОСКИХ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ

I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Освоить методику предварительной оценки прочности металлического покрытия с целью определения его оптимальной толщины.

II. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Основной причиной низкой прочности покрытий является наличие в них больших разрушающих остаточных напряжений. Возникновение остаточных напряжений связано с различием температуры частиц и основы, их коэффициентами термического расширения, усадкой при кристаллизации, соотношением толщин покрытия и основы. Бессистемный (необоснованный) выбор толщин покрытий часто приводит к их разрушению в процессе напыления, при механической обработке, а также в период эксплуатации изделий. Поэтому в работе излагается методика, позволяющая назначать толщину покрытия с учётом её влияния на уровень остаточных напряжений.

Сравнительный анализ действующих сил в покрытии на плоской поверхности (рис.1) показал: а) наибольшее разрушающее действие на материал покрытия оказывают растягивающие остаточные напряжения $\sigma^p_{ост}$; б) величина предела прочности материала покрытия σ_b лимитирует прочность покрытия. Все остальные технологические параметры (форма напыляемой поверхности, способы её подготовки и др.) будут оказывать влияние через эти факторы. Для надежной прочности покрытия на плоской поверхности необходимо обеспечить соотношение

$$\sigma^p_{ост} < \sigma_b \quad (1)$$

Практика напыления показывает, что критическая толщина покрытий на выпуклой замкнутой поверхности в 1,5-3 раза больше, чем на плоской поверхности. Причина повышения состоит в более благоприятном для покрытия перераспределении составляющих остаточных напряжений (рис.2). В этом случае превалирующими разрушающими силами будут касательные остаточные напряжения $\sigma^k_{ост}$. Причем сопротивление действию этих сил будет усиливаться с ростом высоты рельефа на поверхности основы. Таким образом на выпуклой замкнутой поверхности касательные остаточные напряжения будут встречать противодействие целого комплекса сил, которые можно охарактеризовать как прочность сцепления покрытий с основой $-\sigma_{сц}$. Запас прочности покрытий на наружных цилиндрических поверхностях будет обеспечен при условии, если

$$\sigma_{сц} < \sigma^k_{ост} \quad (2)$$

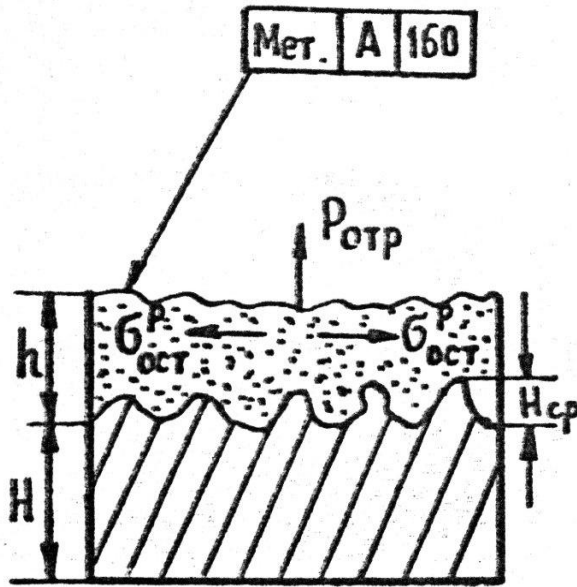


Рис.1. Распределение составляющих остаточных напряжений в покрытии на плоской поверхности: $P_{отр}$ – отрывающие силы; $\sigma_{ост}^P$ – растягивающие напряжения; $H_{ср}$ – средняя высота неровностей; h – толщина покрытия; H – высота основы.

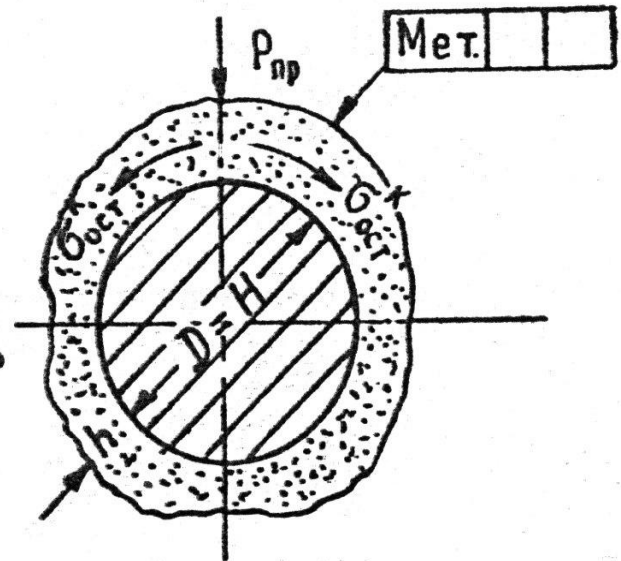


Рис.2. Распределение составляющих остаточных напряжений в покрытии на наружной цилиндрической поверхности: $P_{пр}$ – прижимающие силы; $\sigma_{ост}^K$ – касательные напряжения; $D(H)$ – диаметр основы

Примечание: Условное обозначение электрометаллизационного покрытия: Мет – покрытие, нанесенное методом электродуговой металлизации; А – материал покрытия; А – алюминий, Ж – сталь, Ц – цинк, М – медь; 160 – цифра обозначает толщину покрытия в мкм.

Растягивающие $\sigma_{ост}^P$ или касательные $\sigma_{ост}^K$ остаточные напряжения в покрытии можно рассчитать по следующей формуле:

$$\sigma_{ост} = \frac{E_2 * (\alpha_1 - \alpha_2)}{1 + E_2 * H / E_1 * h} * \frac{(T_2 - T_1)}{1 - \mu}, \text{ Н/м}^2 \quad (3)$$

E_1, E_2 – модули упругости материала основы и покрытия (табл.2);

α_1, α_2 – коэффициенты термического расширения материалов основы и покрытия (табл.2);

T_1, T_2 – температуры основы ($T = 20^\circ\text{C}$) и плавления материала покрытия (табл.2);

$H(D), h$ - толщина (диаметр) основы и покрытия (табл.1);

$\mu = 0,25$ - обобщенный коэффициент Пуассона (табл.2).

Зависимость прочности сцепления слоя с цилиндрической поверхностью от ряда технологических факторов можно оценить с помощью формулы:

$$\sigma_{cu} \approx \frac{E_2 \cdot \alpha_2 \cdot (T_2 - T_1) \cdot D}{\pi \cdot h} \cdot A \cdot H_{cp}, \text{ Н/м}^2 \quad (4)$$

где D - наружный диаметр вала, м (табл.1);

A - коэффициент (табл.5);

h - толщина покрытия, м (табл.1);

E_2 - модуль упругости материала покрытия, Н/м² (табл.2);

α_1 - коэффициент терм. расширения материала покрытия, 1/град (табл.2);

T_1, T_2 - температура основы ($T_1 = 20^\circ\text{C}$) и плавления матер. покр. (табл.2);

H_{cp} - средняя высота неровностей на поверхности основы, мкм.

III. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. С помощью штангенциркуля выполнить необходимые измерения напыленных образцов плоской и цилиндрической формы. Образцы изготовлены из стали и алюминиевого сплава. В качестве исходного материала для покрытий использована алюминиевая, стальная, медная и цинковая проволоки диаметром 1,6 мм.
2. Выполнить расчет прочности покрытий на заданных образцах в соответствии с индивидуальным заданием, представленных в таблице 1. при расчетах использовать справочные данные, приведенные в таблицах 2-5. Типичное условие: на стальную (алюминиевую) плоскую (цилиндрическую) деталь необходимо нанести алюминиевый (стальной) защитный слой; толщина (диаметр) детали H (D), толщина покрытия h ; определить запас прочности покрытия при заданных размерах и сочетаниях материалов.

IV. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Эскизы образцов для напыления с условным обозначением покрытия, с размерами покрытия и основы, а также с распределением составляющих остаточных напряжений (рисунки 1, 2).
3. Расчет остаточных напряжений и сил сцепления покрытия с основой.
4. По результатам выполненного расчета сделать выводы о прочности покрытий.

V. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Таблица 1

Индивидуальные задания

Номер задания	Материал основы	Плоская поверхность		Цилиндрическая поверхность	
		Толщина основы, $H \cdot 10^2, \text{м}$	Высота слоя, $h \cdot 10^3, \text{м}$	Диаметр основы, $D \cdot 10^2, \text{м}$	Высота слоя, $h \cdot 10^3, \text{м}$
1	Сталь	1,0	0,1	3,0	0,2
2	Сталь	1,3	0,2	3,5	0,4
3	Сталь	1,5	0,3	4,0	0,6
4	Сталь	1,7	0,4	4,5	0,8
5	Сталь	2,0	0,5	4,7	1,0
6	Сталь	2,2	0,6	4,9	1,2
7	Сталь	2,5	0,7	5,0	1,4
8	Сталь	2,7	0,8	5,1	1,6
9	Сталь	3,0	0,9	5,3	1,8
10	Сталь	3,2	1,0	5,5	2,0
11	Алюминий	3,5	1,1	6,0	2,2
12	Алюминий	3,7	1,2	6,5	2,4
13	Алюминий	4,0	1,3	7,0	2,6
14	Алюминий	4,2	1,4	7,3	2,8
15	Алюминий	4,5	1,5	7,5	3,0
16	Алюминий	4,7	1,6	8,0	3,2
17	Алюминий	5,0	1,7	8,5	3,4
18	Алюминий	5,3	1,8	9,0	3,6
19	Алюминий	5,5	1,9	9,5	3,8
20	Алюминий	6,0	2,0	9,8	4,0

Примечания: Материал покрытия (сталь, медь, алюминий, цинк) и способ подготовки поверхности (обдыв кварцевым песком, нанесение рваной резьбы, химическое травление)- согласовываются с преподавателем

Таблица 2

Значения теплофизических коэффициентов металлов основы и покрытия

Металл	Коэффициент теплового расширения, 1/град		Модуль упругости, Н/м^2		Температура плавления металла, $T_2, ^\circ\text{C}$	Коэффициент Пуассона μ
	Основы $\alpha_1 \cdot 10^{-6}$	Покрытия $\alpha_2 \cdot 10^{-6}$	Основы $E_1 \cdot 10^9$	Покрытия $E_2 \cdot 10^9$		
Цинк	39,0	12,4	78,0	12,5	420	0,25
Алюминий	26,0	12,1	65,0	6,2	660	
Медь	17,0	11,8	115,0	6,6	1083	
Сталь	13,5	11,0	206,0	13,2	1530	

Таблица 3.

Предел прочности металла покрытия на растяжение	
Материал	Предел прочности напыленного материала, σ_b , Н/м ²
Малоуглеродистая сталь	$1,2 \cdot 10^8 \dots 1,96 \cdot 10^8$
Алюминий А2	$0,29 \cdot 10^8 \dots 0,49 \cdot 10^8$
Цинк	$0,34 \cdot 10^8$
Медь	$0,25 \cdot 10^8$

Таблица 4.

Характеристики шероховатости обработанной поверхности	
Способ подготовки поверхности	Средняя высота микронеровностей, H_{cp} , мкм
Обдув кварцевым песком (пескоструйная обработка)	16...18
Нанесение рваной резьбы (на токарном и фрезерном станках)	70...100
Химическое травление	5...120

Таблица 5.

Коэффициенты для расчета прочности

Металл покрытия	Коэффициент А
Цинк	$9,6 \cdot 10^{-3}$
Алюминий	$5,35 \cdot 10^{-3}$
Сталь	$3,79 \cdot 10^{-3}$
Латунь	$1,89 \cdot 10^{-3}$

VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие последствия вызывают остаточные напряжения в покрытии?
2. В чем и когда проявляется разрушающее действие остаточных напряжений?
3. Что является причиной появления остаточных напряжений в покрытии?
4. Как влияет форма и способы подготовки напыляемой поверхности на распределение остаточных напряжений в покрытии?
5. Какими технологическими методами можно управлять прочностью электрометаллизационных (напыленных) покрытий?

VII. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Примеры расчета прочности покрытий представлены в виде окон программы MathCAD. Программа может быть использована преподавателем для проверки расчетных заданий студентов или самими студентами (с ведома преподавателя) в случае затруднений при расчетах.

Mathcad Professional - [Лаб_Раб по МКМиП_Покрытие]

Файл Правка Вид Вставка Формат Математика Символьная математика Окна Помощь

Normal Arial 10 **B** *I* U [Icons] 100% [Icons]

Определение прочности электрометаллизационных покрытий

1. На плоских деталях:

$\sigma_{ost} < \sigma_b$ - условие прочности покрытия,
где σ_{ost} - остаточные растягивающие напряжения в покрытии, Н/м²; σ_b - предел прочности покрытия, Н/м²

$\sigma_{b1} := 1.5 \cdot 10^8$ - предел прочности напыленного покрытия из малоуглеродистой стали, Н/м²

$\sigma_{b2} := 0.4 \cdot 10^8$ - предел прочности напыленного покрытия из алюминия А2, Н/м²

$\sigma_{b3} := 0.34 \cdot 10^8$ - предел прочности напыленного покрытия из цинка, Н/м²

$\sigma_{b4} := 0.25 \cdot 10^8$ - предел прочности напыленного покрытия из меди, Н/м²

Стальное покрытие (индекс - 2p), напыленное на алюминиевую основу (индекс - 1m):

$E_{1m} := 65 \cdot 10^9$ $\alpha_{1m} := 26 \cdot 10^{-6}$ $T_{1m} := 20$ - модули упругости E (Н/м²) и коэффициенты теплового расширения α (1/град) покрытия и основы; температура основы T_{1m} и температура плавления материала покрытия T_{2p} (°C)

$E_{2p} := 13.2 \cdot 10^9$ $\alpha_{2p} := 11 \cdot 10^{-6}$ $T_{2p} := 1530$

$\mu := 0.25$ - коэффициент Пуассона для металлов

$i := 0, 1..9$

$H(i) := 0.035 + 0.0025 \cdot i$ - толщина основного металла (алюминий), м

$h(i) := 0.0011 + 0.0001 \cdot i$ - толщина напыленного покрытия (сталь), м

$$\sigma_{ost_i} := \frac{E_{2p} \cdot (\alpha_{1m} - \alpha_{2p}) \cdot (T_{2p} - T_{1m})}{\left(1 + \frac{E_{2p} \cdot H(i)}{E_{1m} \cdot h(i)}\right) \cdot (1 - \mu)}$$

$H(i) =$	$h(i) =$	$\sigma_{ost_i} =$
0.035	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$5.343 \cdot 10^7$
0.038	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$5.427 \cdot 10^7$
0.04	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$5.5 \cdot 10^7$
0.043	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$5.564 \cdot 10^7$
0.045	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$5.621 \cdot 10^7$
0.048	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$5.671 \cdot 10^7$
0.05	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$5.717 \cdot 10^7$
0.053	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$5.758 \cdot 10^7$
0.055	$1.9 \cdot 10^{-3}$	$5.795 \cdot 10^7$
0.058	$2 \cdot 10^{-3}$	$5.829 \cdot 10^7$

$\sigma_{ost} < \sigma_b$ - условие прочности покрытия

$\sigma_{b2} := 1.5 \cdot 10^8$ - предел прочности покрытия (сталь)

Условие прочности покрытия выполняется - покрытие выдержит напряжения для любых пар значений (H,h) !

Шесть AUTO Page 1

Mathcad Professional - [Лаб_Раб по МКМиП_Покрытие]

Файл Правка Вид Вставка Формат Математика Символьная математика Окна Помощь

Normal Arial 10 B I U

2. На цилиндрических деталях:

$\sigma_{ost} < \sigma_{cz}$ - условие прочности покрытия,
 где σ_{ost} - остаточные растягивающие напряжения в покрытии, Н/м²;
 σ_{cz} - прочность сцепления покрытия с основой, Н/м²

Алюминиевое покрытие (индекс - 2p), напыленное на стальную основу (индекс - 1m):

$E_{1m} := 206 \cdot 10^9$ $\alpha_{1m} := 13.5 \cdot 10^{-6}$ $T_{1m} := 20$ - модули упругости E (Н/м²) и
 коэффициенты теплового
 $E_{2p} := 6.2 \cdot 10^9$ $\alpha_{2p} := 12.1 \cdot 10^{-6}$ $T_{2p} := 660$ расширения α (1/град) покрытия и
 основы; температура основы T_{1m}
 и температура плавления
 материала покрытия T_{2p} (°C)

$\mu := 0.25$ - коэффициент Пуассона для металлов

$i := 0, 1..9$

$D(i) := 0.03 + 0.0025 \cdot i$ - толщина (диаметр) основного металла (сталь), м

$h(i) := 0.0002 + 0.0002 \cdot i$ - толщина напыленного покрытия (алюминий), м

$$\sigma_{ost_i} := \frac{E_{2p} \cdot (\alpha_{1m} - \alpha_{2p}) \cdot (T_{2p} - T_{1m})}{\left(1 + \frac{E_{2p} \cdot D(i)}{E_{1m} \cdot h(i)}\right) \cdot (1 - \mu)}$$

$A := 3.79 \cdot 10^{-3}$ - эмпирический коэффициент основного металла (сталь) для расчета
 прочности покрытия, 1/мкм

$H_{cp} := 17$ - средняя высота микронеровностей основного металла при
 пескоструйной обработке, мкм

$$\sigma_{cz_i} := \frac{E_{2p} \cdot \alpha_{2p} \cdot (T_{2p} - T_{1m}) \cdot D(i) \cdot A \cdot H_{cp}}{3.14 \cdot h(i)}$$

D(i) =	h(i) =	$\sigma_{ost_i} =$	$\sigma_{cz_i} =$
0.03	$2 \cdot 10^{-4}$	$1.343 \cdot 10^6$	$1.478 \cdot 10^8$
0.033	$4 \cdot 10^{-4}$	$2.15 \cdot 10^6$	$8.005 \cdot 10^7$
0.035	$6 \cdot 10^{-4}$	$2.688 \cdot 10^6$	$5.747 \cdot 10^7$
0.038	$8 \cdot 10^{-4}$	$3.072 \cdot 10^6$	$4.618 \cdot 10^7$
0.04	$1 \cdot 10^{-3}$	$3.361 \cdot 10^6$	$3.941 \cdot 10^7$
0.043	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$3.585 \cdot 10^6$	$3.489 \cdot 10^7$
0.045	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$3.765 \cdot 10^6$	$3.167 \cdot 10^7$
0.048	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$3.912 \cdot 10^6$	$2.925 \cdot 10^7$
0.05	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$4.034 \cdot 10^6$	$2.737 \cdot 10^7$
0.053	$2 \cdot 10^{-3}$	$4.138 \cdot 10^6$	$2.586 \cdot 10^7$

Условие прочности покрытия:

$\sigma_{ost} < \sigma_{cz}$

Для цилиндрической поверхности условие прочности покрытия выполняется с запасом для любых пар значений (H,h) !

Press F1 for help. AUTO Page 1

Лабораторная работа №8

НАНЕСЕНИЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: ознакомление с особенностями и практическими навыками нанесения и исследования гальванических покрытий на поверхностях металлических изделия.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Применение защитных, защитно-декоративных и специальных покрытий позволяет решать многие задачи, среди которых важное место занимает защита металлов от коррозии. Коррозией называется поверхностное разрушение металлов вследствие химического или электрохимического воздействия на них окружающей среды. Вследствие коррозии выходит из строя огромное количество деталей и конструкций, сложных приборов и машин.

Гальванические покрытия являются одним из эффективных способов защиты от коррозии. Гальванический метод нанесения покрытия имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами. Покрытия получаются блестящими в процессе электролиза. Гальванические покрытия характеризуются хорошими физико-химическими и механическими свойствами: повышенной твердостью и износостойкостью, малой пористостью, высокой коррозионной стойкостью. При гальваническом методе имеется возможность точно регулировать толщину покрытия. Это особенно важно в целях экономии цветных, драгоценных и редких металлов. Наконец, при электролизе водных растворов можно нанести покрытие таких металлов и сплавов, которые другими способами получить не удастся.

Кроме того, гальванические покрытия широко применяются для придания поверхности деталей ряда ценных специальных свойств: повышенной твердости и износостойкости, высокой отражательной способности, улучшенных антифрикционных свойств, поверхностной электропроводности, облегчения паяемости, а также для улучшения внешнего вида изделий.

1. Гальванические процессы при наличии постоянного источника тока

Одним из представителей гальванических процессов является нанесение на поверхность изделия медного покрытия – меднение. Электролиты меднения делятся на два основных типа: кислые и щелочные. К кислым электролитам относятся сернокислые, фторборатные, кремнефторидные и сульфаминовые. К щелочным электролитам относятся цианидные, пирофосфатные.

Кислое меднение. Наиболее широкое использование из кислых электролитов в промышленности имеют сернокислые электролиты, которые дешевы, просты по составу, устойчивы при работе и допускают высокие плотности тока. Недостатками кислых электролитов являются их незначительная рассеивающая способность, невозможность непосредственного покрытия в них железа, цинка их сплавов вследствие контактного выделения меди.

При кислотном меднении применяют ванну с электролитом следующего состава:

Сульфат меди $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 220 г/л

Серная кислота H_2SO_4 30 г/л

В электролит помещают два электрода, например две медные пластины, которые соединяются с источником тока (рисунок 1). Важнейшей составной частью ванны является сульфат меди. Он диссоциирует в воде по реакции

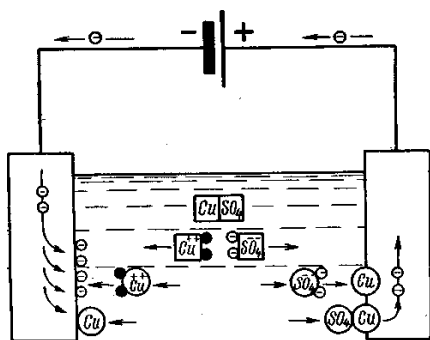


Рисунок 1 - Схема процесса, протекающего в гальванической ванне с источником тока (медные электроды погружены в раствор CuSO_4)

Серная кислота препятствует образованию Cu_2O на катоде, повышает электропроводность электролита и уменьшает степень диссоциации CuSO_4 , что способствует получению мелкозернистого покрытия. В спокойном состоянии, т.е. пока в ванну не подано напряжение, оба медных электрода покрываются медью, выделяющейся из электролита, вследствие высокого осмотического давления. Это будет происходить до тех пор, пока потенциал напряжений атомов и ионов меди не выровняется.

Если включается ток, то этот потенциал покоя смещается: под воздействием напряжения от постороннего источника тока один электрод заряжается отрицательно и становится катодом. Благодаря этому повышается осмотическое давление ванны, так как на поверхности катода образуется избыток электронов. Он должен компенсироваться вследствие того, что ионы меди из раствора ванны, осаждаясь на поверхности катода, отнимают у него электроны и таким путем дополняются до нейтральных атомов меди $\text{Cu}^{++} + 2e \rightarrow \text{Cu}$ -атом. (рисунок 2).

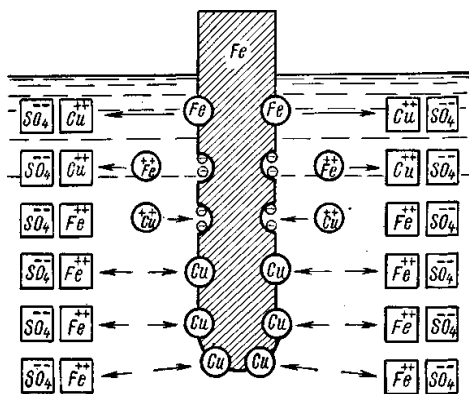
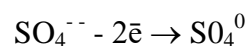


Рисунок 2 - Схема ионного обмена (железная пластина погружена в раствор медной соли).

Под воздействием тока от постороннего источника вторая медная пластина заряжается положительно и становится анодом, ее электроны отнимаются и передаются во внешнюю цепь. Ток от постороннего источника действует так, что металл анода становится электрически неблагородным. Его осмотическое давление уменьшается настолько, что давление раствора ванны оказывается больше. Отрицательный ион ванны SO_4^{--} вынужден из-за этого отдать свои избыточные электроны аноду



Итак, оба компонента ванны Cu^{++} и SO_4^{--} вынуждены уравнивать свои заряды. Они становятся электрически нейтральными, благодаря чему в ванне опять устанавливается состояние равновесия. Нейтральный SO_4 отнимает у металла анода один Cu -атом, дополняется благодаря этому опять до молекулы CuSO_4 , которая диссоциирует затем на Cu^{++} и SO_4^{--} . Этим достигается исходное состояние, и процесс начинается снова. Содержание металла в ванне остается теоретически постоянным. На практике оно изменяется из-за одновременно протекающего вторичного процесса.

Процесс меднения широко используется в промышленности как предварительный этап формирования более сложных покрытий. Это связано с тем, что формирующийся при меднении поверхностный слой обладает высокой адгезионной способностью и является своеобразной подложкой для облегчения нанесения последующих металлических покрытий.

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1 Нанесение гальванического покрытия.

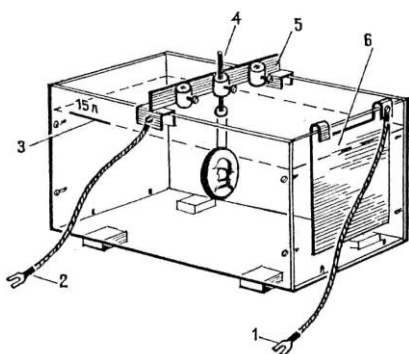


Рисунок 3 - Схема гальванической установки: 1 – "плюс" источника тока (подсоединяется к реостату), 2 – "минус" источника тока, 3 – отметка уровня электролита, 4 – подвес, 5 – катодная штанга, 6 – анодная пластина.

Гальваническая установка состоит из ванны с электролитом, анодной пластины, катодной штанги, источника постоянного тока на 6-12 Вольт, амперметра и реостата (рисунок 3). Гальваническое осаждение металла на поверхности предмета возможно только при условии, что вся поверхность предмета или весь предмет являются проводниками электрического тока.

Приготовление электролита. В гальванической установке происходит электролиз раствора сернокислой меди (медного купороса) в результате на катоде осаждается чистая медь. Простой электролит

меднения, как указывалось выше, состоит из 220 г сернокислой меди, 27 мл серной кислоты. Раствор доливается водой до объема 1 литр. Концентрация выражается в граммах на один литр раствора. Сначала берется 2/3 нормы воды, при повышенной температуре растворяют в ней расчетное количество соли меди. Раствор остужают и фильтруют. Затем осторожно, тонкой струей при помешивании приливают серную кислоту. Раствор сильно разогревается, и его следует охлаждать.

Внимание! Нельзя лить воду в кислоту – кислота при этом разбрызгивается и может вызвать тяжелые ожоги кожи и глаз. В остывший электролит доливают воду до заданного объема.

Технологическая оснастка. Ответственной операцией является электрическое соединение токопроводящего слоя с минусом источника тока. Для соединения используется отоженный и очищенный медный провод диаметром 0,2–0,5 мм или шинка – полоска мягкой фольги, к которой припаян конец контактного провода.

Если нужно металлизировать не весь предмет, то части его, на которых осажденного металла быть не должно, защищают слоем парафина или воска (изолируют).

Расчет толщины покрытия. Чтобы получить слой меди заданной толщины, нужно в цепи ванны установить определенный ток и знать время, в течение которого толщина меди достигнет желаемой величины. Для этого необходимо подсчитать площадь поверхности предмета.

Зная площадь поверхности предмета, можно вычислить массу осажденной меди при заданной толщине слоя по формуле:

$$M = S \cdot 0,9 \cdot c$$

где M – масса меди в граммах,

S – площадь в см^2 ,

c – толщина в мм.

Время, необходимое для отложения такого количества меди, и величина тока в ванне обратно зависимы: время сокращается, если увеличивать ток.

Величину тока, которую нужно установить реостатом в цепи ванны при выбранной плотности тока, определяют по формуле $I = D \cdot S$, где I – ток в амперах, D – плотность тока в А/см^2 , S – площадь поверхности в см^2 . Также можно подсчитать, сколько времени займет металлизация: $T = M / (1,2 \cdot I)$, где T – время в часах, M – масса меди в граммах, I – ток в амперах.

2.2 Определение твердости и толщины гальванического покрытия.

Для определения твердости и толщины полученного гальванического покрытия необходимо приготовить поперечный макрошлиф образца, на который нанесено покрытие. Установить образец на предметный столик микротвердомера ПМТ-3 и определить микротвердость покрытия, а также с использованием микрометрических винтов перемещения столика определить толщину покрытия. Полученные данные заносятся в таблицу:

№ образца	Режим нанесения покрытия	Толщина покрытия, мм	Микротвердость, МПа
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			

3. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

3.1 Цель работы.

3.1 Краткая характеристика процессов, происходящих в ванне при наличии постоянного источника тока, при получении гальванического покрытия.

3.2 Анализ результатов практического определения толщины и микротвердости образцов.

3.3 Заполнить таблицу результатов экспериментов.

3.4 Сделать выводы на основании полученных результатов.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1 С какой целью применяют гальванические покрытия?

4.2 Опишите процессы происходящие в гальванической ванне при наличии постоянного источника тока?

4.3 В чем состоит подготовка поверхности перед нанесением гальванического покрытия?

4.4 Объясните роль серной кислоты в электролите?

4.5 При каком условии возможно гальваническое осаждение металла?

4.6 Опишите зависимость толщины покрытия от времени и плотности тока?

4.8 Каким образом выполняются измерения толщины и микротвердости покрытия?

РЕКОМЕНДУЕМОЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Технология конструкционных материалов. Учебник для машиностроительных специальностей вузов. / Под общ. редакцией А.М. Дальского - М. Машиностроение. 1992
- 2 Материаловедение и технология металлов/ Учебник для ВУЗов под ред Г.П.Фетисова.- М.:Высшая школа, 2001. –638 с.
- 3 Дриц М.Е., Москалев М.А. Технология конструкционных материалов и материаловедение. М.: Высшая школа, 1990. - 447 с.
- 4 Технология композиционных материалов: Учеб. пособие/ Рубанов В.В., Колотиенко С.Д., Кохановский В.А. и др. ДГТУ.- Ростов-на-Дону, 1995. – 89 с.