

## AFK 502 R – AFK 1 – AFK 18 МАГНИТНО-МЯГКИЕ Fe-Co-СПЛАВЫ

### I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

В последнее время было отмечено развитие электротехнического оборудования, что привело к росту потребности в миниатюризации вспомогательных устройств для производства и преобразования электроэнергии. Это особенно касается встроенных электрических систем в летательных аппаратах, поездах и автомобилях.

Отношение мощность/вес таких систем можно оптимизировать применением магнитно-мягких Fe-Co-сплавов, к необычным свойствам которых относятся:

- высокая индукция насыщения – самая высокая из всех известных магнитных сплавов
- улучшенная магнитная проницаемость при рабочих индукциях выше или равных 1,6 Тл по сравнению с проницаемостью обычно используемых магнитных материалов, таких как железо и железокремниевые сплавы
- достаточно высокое электросопротивление сплава AFK 502 R (марка для роторов), что позволяет снизить потери для переменного тока и при высоких значениях индукции
- точка Кюри между 950°C и 980°C и, как следствие, магнитные свойства мало изменяются при температурах 250–500°C, что является существенным преимуществом для высокотемпературных применений.

На рис. 1 приведены кривые "индукция–прикладываемое поле", которые показывают превосходство марок AFK перед Fe-Si-сплавами при высоких значениях индукции. Их можно использовать для приблизительной оценки возможной выгоды в отношении требований к поперечному сечению, весу и занимаемому объему.

**Типичные кривые намагничивания постоянным током**

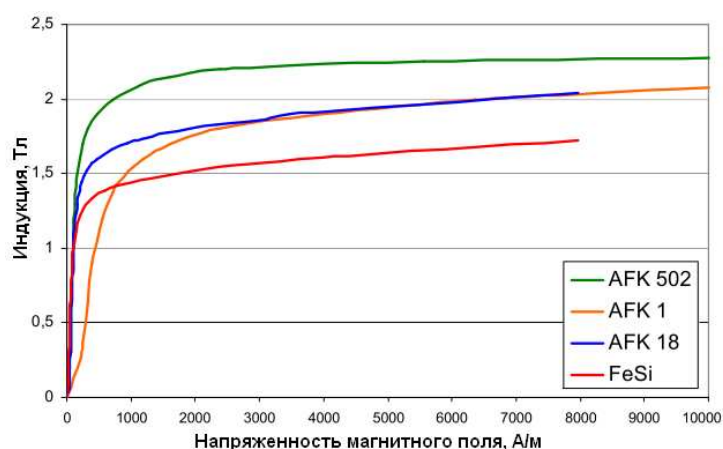


Рис. 1. Начальная кривая намагничивания  $B = f(H)$  в постоянном магнитном поле при окружающей температуре; измерения проводились на кольцах толщиной 0,35 мм

Более того, следует отметить, что листы из Fe-Co-сплава легко поддаются штамповке перед окончательной термообработкой, причем износ режущего инструмента более низкий по сравнению со штамповкой листов из Fe-Si-сплавов.

По требованию заказчика результаты измерения могут быть предоставлены в компьютерном формате.

В соответствии с результатами исследований компания Imphy Alloys разработала серию железокобальтовых сплавов с содержанием кобальта 18–49% с незначительными добавками других легирующих элементов, таких как хром или ванадий. Роль последнего состоит как в увеличении пластичности сплавов и, следовательно, в облегчении обработки (ковки и холодной прокатки), так и в повышении электросопротивления.

Марки Fe-Co-сплавов, разработанные компанией Imphy Alloys, можно разделить на три группы в зависимости от содержания в них Co:

Элемент (мас.%) Сплав	Fe	Co	V	Cr	Mn
AFK 502 R	ост.	49	2		
AFK 1	ост.	27		0,5	0,3
AFK 18	ост.	18			0,3

Сплав **AFK 502 R** имеет несколько более низкую индукцию насыщения, чем сплав AFK 1, но более высокую магнитную проницаемость в магнитных полях средней напряженности. Его электросопротивление в два раза выше, чем у AFK 1.

Сплав **AFK 1** обладает самой высокой индукцией насыщения, но его магнитная проницаемость ниже, чем у сплава AFK 502. Сплав особенно пригоден для намагничивания постоянным током, например, в качестве полюсов электромагнитов и масс-спектрографов, а в обычном плане – для различных компонентов, работающих при высоких значениях индукции.

Сплав **AFK 18** имеет более низкое содержание кобальта, и в отношении его содержания этот сплав лежит между марками Fe-Si-сплавов и сплавом AFK 502 R. Для этого сплава характерно сочетание высокого магнитного насыщения и рабочей индукции благодаря присутствию кобальта; электросопротивление сплавов AFK 18, AFK 502 R и Fe-3%Si близки; механические свойства такие же, как у AFK 502 R; магнитострикция значительно ниже, чем у AFK 502 R и близка к магнитострикции Fe-Si; сплав имеет удовлетворительную склонность к формоизменению (штамповке, вырубке, изгибу, глубокой вытяжке и т.д.) как в холоднодеформированном, так и отожженном состояниях. В последнем случае его формоизменение очень близко к формоизменению сплавов Fe-Si.

Все эти сплавы пригодны для работы в переменном магнитном поле, например, в электродвигателях с высокой плотностью мощности, генераторах и силовых трансформаторах.

Их высокий коэффициент магнитострикции также дает возможность использовать их в качестве сердечников магнитострикционных преобразователей.

## **II. ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ ТЕРМООБРАБОТКА**

Целью термообработки, которая выполняется на готовых деталях, является устранение внутренних напряжений, возникающих в результате холодной обработки, и придание металлу необходимого равновесия между магнитными и механическими свойствами.

## II.1. Подготовка деталей

Рекомендуется, особенно для тонких деталей, тщательно обезжирить поверхность перед термообработкой, чтобы избежать риска загрязнения поверхности.

Более того, для предотвращения слипания деталей при термообработке желательно покрыть их пленкой инертного безводного материала, например, тальком, оксидом магния или алюминия.

Что касается тяжелых деталей, необходимо обеспечить плоскую опору в соответствии с формой и весом деталей, чтобы предотвратить их деформацию при термообработке.

## II.2. Атмосфера при термообработке

Термообработка должна проводиться без контакта с кислородом в чистом сухом водороде или в вакууме. Атмосфера с расщепленным аммиаком может использоваться только для сплавов AFK 1 и AFK 18, но не для AFK 502 R, в котором происходит азотирование, приводящее к резкому ухудшению магнитных свойств.

## II.3. Рекомендованные циклы

Следует отметить, что превышение указанных ниже температур недопустимо, так как в противном случае магнитные свойства сплавов будут непоправимо ухудшены. Такое ухудшение свойств происходит сразу же при достижении температуры аллотропического превращения  $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ , равной приблизительно 900°C для AFK 502 R и AFK 1 и 940°C для AFK 18.

Марка	Типичная термообработка
AFK 502 R	➤ Обработка с целью оптимизации магнитных свойств: 2-3 ч при 850°C в чистом сухом водороде или в вакууме с последующим охлаждением со скоростью 250°C в той же атмосфере. Для сокращения времени обработки охлаждение можно проводить на воздухе при температуре ниже 300°C
	➤ Обработка с целью оптимизации механических свойств: 2-3 ч при 725°C в чистом сухом водороде или в вакууме с последующим охлаждением со скоростью 250°C в той же атмосфере. Для сокращения времени обработки охлаждение можно проводить на воздухе при температуре ниже 300°C
AFK 1	➤ Обработка с целью оптимизации магнитных свойств: 2-3 ч при 850°C в чистом сухом водороде или в расщепленном аммиаке с последующим охлаждением со скоростью 250°C в той же атмосфере
	➤ Обработка с целью оптимизации механических свойств: 2-3 ч при 725°C в чистом сухом водороде или в расщепленном аммиаке с последующим охлаждением со скоростью 150°C в той же атмосфере
AFK 18	1-4 ч при 900-920°C в атмосфере чистого сухого водорода, в вакууме или в инертной атмосфере (редкий газ) с последующим охлаждением в той же атмосфере

Со всеми магнитными материалами после термообработки следует обращаться осторожно, избегая ударов или пластической деформации. Такие меры предосторожности особенно рекомендуются для сплава AFK 502 R, чья деформационная способность ограничена.

После термообработки сплавы показывают относительное удлинение  $\frac{\Delta l}{l}$  порядка  $1 \div 1,5 \times 10^{-3}$ . Это необходимо предусматривать в конкретных случаях, когда размерные допуски деталей узлов должны находиться в узких пределах.

### III. ТИПИЧНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

Магнитные свойства приводятся при окружающей температуре в состоянии полного отсутствия в сплаве механических напряжений. Любая деформация, даже упругая, будет ухудшать магнитные свойства. Однако в случае чисто упругой деформации металл будет возвращать свои первоначальные свойства после снятия напряжения.

#### III.1. AFK 502 R

III.1. Холоднокатаная полоса из сплава AFK 502 R

Свойства	Единицы	AFK 1
Индукция насыщения	Тл	2,35
Электросопротивление при 20°C	мкОм·см	40
Точка Кюри	°C	900
Плотность	г/см <sup>3</sup>	8,12
Средний коэф. теплового расширения от 0°C до 100°C	10 <sup>-6</sup> ·°C <sup>-1</sup>	9,5
Средний коэф. теплового расширения от 0°C до 300°C	10 <sup>-6</sup> ·°C <sup>-1</sup>	9,5
Средний коэф. теплового расширения от 0°C до 500°C	10 <sup>-6</sup> ·°C <sup>-1</sup>	9,8
Удельная теплопроводность от 0°C до 100°C	Вт·м <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	29
Удельная теплопроводность от 0°C до 300°C	Вт·м <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	32
Удельная теплопроводность от 0°C до 500°C	Вт·м <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	35
Коэффициент магнитострикции $\frac{\Delta l}{l}$ при насыщении	10 <sup>-6</sup>	60–70
Модуль Юнга неотожженной холоднокатаной полосы	МПа	210 000 – 220 000
Модуль Юнга отожженной холоднокатаной полосы	МПа	180 000 – 200 000

В таблице ниже приводятся магнитные свойства, полученные для трех видов термообработки, для тех случаев, когда требуется компромисс между магнитными и механическими свойствами. Измерения проводили на кольцах размером 36×25×0,35 мм (наружный диаметр × внутренний диаметр × толщина).

Магнитные потери (Вт/кг)				
Условия измерения	f = 50 Гц		f = 400 Гц	
	B = 1,5 Тл	B = 2 Тл	B = 1,5 Тл	B = 2 Тл
<b>Термообработка</b>				
2 ч при 725°C, охлаждение со скоростью 250°C/ч			51,9	91,3
2 ч при 750°C, охлаждение со скоростью 150°C/ч	3	5	44	84
3 ч при 850°C, охлаждение со скоростью 250°C/ч	2,3	3,8	42,1	73,6

### III.1.2. Пруток (массивный) из сплава AFK 502 R

Характеристики постоянной намагниченности					
Термообработка	В (Тл) при 800 А/м	В (Тл) при 1600 А/м	В (Тл) при 4000 А/м	В (Тл) при 8000 А/м	Нс, (А/м)
2 ч при 760°C в Н <sub>2</sub> , охлаждение со скоростью 200°C/ч	> 1,8	> 2	> 2,2	> 2,25	160
3 ч при 850°C в Н <sub>2</sub> , охлаждение со скоростью 250°C/ч	> 2	> 2,1	> 2,2	> 2,25	110
6 ч при 870°C в вакууме, охлаждение со скоростью 250°C/ч	> 2	> 2,15	> 2,2	> 2,25	80

### III.2. Холоднокатаная полоса из сплава AFK 1

Свойства	Единицы	AFK 1
Индукция насыщения	Тл	2,4
Электросопротивление при 20°C	мкОм·см	20
Точка Кюри	°C	980
Плотность	г/см <sup>3</sup>	8
Средний коэф. теплового расширения от 0°C до 100°C	10 <sup>-6</sup> ·°C <sup>-1</sup>	10,3
Средний коэф. теплового расширения от 0°C до 300°C	10 <sup>-6</sup> ·°C <sup>-1</sup>	10,3
Средний коэф. теплового расширения от 0°C до 500°C	10 <sup>-6</sup> ·°C <sup>-1</sup>	11
Удельная теплопроводность от 0°C до 100°C	Вт·м <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	46
Удельная теплопроводность от 0°C до 300°C	Вт·м <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	67
Удельная теплопроводность от 0°C до 500°C	Вт·м <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	84
Коэффициент магнитострикции $\frac{\Delta l}{l}$ при насыщении	10 <sup>-6</sup>	30–35

В таблице ниже приводятся магнитные свойства, полученные для двух видов термообработки, для тех случаев, когда требуется компромисс между магнитными и механическими свойствами. Измерения проводили на кольцах размером 36×25×0,35 мм (наружный диаметр × внутренний диаметр × толщина).

Характеристики постоянной намагниченности					
Термообработка	В (Тл) при 800 А/м	В (Тл) при 800 А/м	В (Тл) при 800 А/м	В (Тл) при 800 А/м	Нс, (А/м)
2 ч при 725°C, охлаждение со скоростью 150°C/ч	> 1,47	> 1,73	> 2,02	> 2,19	200
2 ч при 850°C, охлаждение со скоростью 250°C/ч	> 1,47	> 1,73	> 2,02	> 2,19	95

### III.3. Холоднокатаная полоса из сплава АФК 18

Свойства	Единицы	АФК 18
Индукция насыщения	Тл	2,3
Электросопротивление при 20°C	мкОм·см	30
Точка Кюри	°С	940
Плотность	г/см <sup>3</sup>	7,9
Средний коэф. теплового расширения от 0°C до 100°C	10 <sup>-6</sup> ·°С <sup>-1</sup>	10,5
Средний коэф. теплового расширения от 0°C до 300°C	10 <sup>-6</sup> ·°С <sup>-1</sup>	10,5
Средний коэф. теплового расширения от 0°C до 500°C	10 <sup>-6</sup> ·°С <sup>-1</sup>	11,2
Удельная теплопроводность от 0°C до 100°C	Вт·м <sup>-1</sup> ·°С <sup>-1</sup>	57
Удельная теплопроводность от 0°C до 300°C	Вт·м <sup>-1</sup> ·°С <sup>-1</sup>	67
Удельная теплопроводность от 0°C до 500°C	Вт·м <sup>-1</sup> ·°С <sup>-1</sup>	84
Коэффициент магнитострикции $\frac{\Delta l}{l}$ при насыщении	10 <sup>-6</sup>	21–26

В таблице ниже приводятся магнитные свойства, полученные для двух видов термообработки, для тех случаев, когда требуется компромисс между магнитными и механическими свойствами. Измерения проводили на кольцах размером 36×25×0,35 мм (наружный диаметр × внутренний диаметр × толщина).

Термообработка	В (Тл) при 2500 А/м	В (Тл) при 5000 А/м	В (Тл) при 10000 А/м	Нс, (А/м)
2 ч при 725°C, охлаждение со скоростью 150°C/ч	> 1,75	> 1,85	> 2	150
2 ч при 850°C, охлаждение со скоростью 250°C/ч	> 1,75	> 1,85	> 2	60

#### Магнитные потери (Вт/кг)

Условия измерения	f = 50 Гц		f = 400 Гц	
	В = 1,5 Тл	В = 1,7 Тл	В = 1,5 Тл	В = 1,7 Тл
Термообработка				
2 ч при 700°C, охлаждение со скоростью 250°C/ч	5,5	6,7	77	99
2 ч при 900°C, охлаждение со скоростью 250°C/ч	3,3	4,3	66	88

#### IV. ТИПИЧНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Подобно другим магнитным сплавам, марки AFK обладают низкой способностью к деформации в холоднообработанном (неотожженном) состоянии. Однако что касается сплава AFK 502 R, обычный отжиг не восстанавливает полностью деформационную способность, которая остается довольно низкой, как можно отметить из значений относительного удлинения ( $\delta$  %) в таблице ниже. Такая низкая деформационная способность увеличивает неопределенность измеренных значений условного предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) и предела прочности при растяжении ( $\sigma_B$ ), **которые поэтому являются лишь ориентировочными по характеру**. Хотя абсолютные значения удлинения невелики, они, как оказывается, являются достаточными, чтобы дать возможность производить детали из листов, которые собираются и используются для изготовления электродвигателей, удовлетворяющих требованиям гражданской и военной авиации.

Более того, пластичность сплава AFK 502 R можно улучшить отжигом при температуре ниже 760°C с последующим охлаждением и при подходящей скорости. Однако поскольку прирост удлинения получается за счет магнитных свойств и поскольку обработка отжигом, соответствующая оптимальному формоизменению, затруднительна для выполнения, это следует предусматривать при исключительных обстоятельствах.

##### IV.1. Механические свойства холоднокатаной полосы

Приведенные ниже данные представляют собой типичные значения при окружающей температуре для измерений, проведенных по стандартам:

- NF EN 10002 для растягивающих испытаний
- EN ISO 6507 для измерений твердости.

##### AFK 502 R – толщина 0,35 мм

Термообработка	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	Твердость
Состояние после холодной обработки	1200	1150	2	400
2 ч при 725°C, охлаждение со скоростью 150°C/ч	715	450	7,5	255
2 ч при 750°C, охлаждение со скоростью 150°C/ч	600	400	5,5	240
3 ч при 850°C, охлаждение со скоростью 250°C/ч	480	300	4,5	220

##### AFK 1 – толщина 0,35 мм

Термообработка	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	Твердость
Состояние после холодной обработки	1000	900	2	300
2 ч при 725°C, охлаждение со скоростью 150°C/ч	600	350	17	190
3 ч при 850°C, охлаждение со скоростью 250°C/ч	510	250	13	180

##### AFK 18 – толщина 0,35 мм

Термообработка	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	Твердость
Состояние после холодной обработки	850	800	2	310
2 ч при 700°C, охлаждение со скоростью 250°C/ч	470	355	29	185
2 ч при 900°C, охлаждение со скоростью 250°C/ч	380	210	31	175

## VI. АССОРТИМЕНТ ПОСТАВОК

Марка	Обработанные сердечники (1)	Обработанные детали (1)	Холоднокатаная полоса	Длинные и массивные изделия (2)
AFK 502 R	■	■	■	■
AFK 1	■	■	■	■
AFK 18	■	■	■	■

- (1): сердечники, профили, пакетированные пластины, роторные и статорные пластины, пластины для химико-механической обработки, продаваемые компанией MECAGIS, дочерней компании Imphy Ugine Précision, подобной компании Imphy Alloys;  
(2): прутки, профили, штампованная поковка, холоднокатаные листы.

Сплавы AFK могут поставляться:

**- В виде холоднокатаных полос из AFK 1, AFK 502 R и AFK 18 в состоянии после холодной деформации**

Этот обычный выбор, когда пользователи хотят механически обрабатывать или штамповать детали из промежуточных пластин, круглых профилей или полос. Термообработка деталей проводится после проведения всех механических операций.

Полоса может также поставляться с изолирующей пленкой из метилата магния.

**- В виде холоднокатаных полос из AFK 18 в отожженном состоянии**

Это состояние используется в тех случаях, когда пользователи предпочитают штамповать или механически обрабатывать детали из полос и монтировать их непосредственно в электрические приборы без проведения окончательной термообработки для оптимизации магнитных свойств. Отожженное состояние поставленных магнитных материалов может оказаться удовлетворительным в том случае, если материалы работают при насыщении или в сильных импульсных магнитных полях.

**- В виде готовых к применению термообработанных деталей из AFK 1, AFK 502 R или AFK 18**

Компания Mécagis, дочерняя компания Imphy Ugine Précision, подобной компании Imphy Alloys, может поставлять предварительно штампованные детали и спиральные ленточные сердечники в состоянии после термообработки для оптимизации требуемых свойств.

## V.1. Плоский прокат

В таблице ниже приводится стандартный ассортимент поставок.

AFK 502 R			
Ассортимент	Толщина, мм	Макс. ширина, мм	Состояние
Холоднокатаная полоса, поставляемая в рулонах	0,1 – 0,5	200	холодная деформация
	1 – 1,3	50	холодная деформация
Горячекатаная полоса	5 ÷ 50	500 ÷ 2000	после прокатки и травления

AFK 1			
Ассортимент	Толщина, мм	Макс. ширина, мм	Состояние
Холоднокатаная полоса, поставляемая в рулонах	0,1 – 0,5	300	холодная деформация
	1 – 1,3	50	холодная деформация
Горячекатаная полоса	5 ÷ 50	500 ÷ 2000	после прокатки и травления

AFK 18			
Ассортимент	Толщина, мм	Макс. ширина, мм	Состояние
Холоднокатаная полоса, поставляемая в рулонах	0,1 – 0,5	300	хол. деформ. или отжиг
	1 – 1,3	50	холодная деформация
Горячекатаная полоса	5 ÷ 50	500 ÷ 2000	после прокатки и травления

### Примечание.

Из-за ограниченной деформационной способности и риска растрескивания при отсутствии соответствующей опоры, стержни небольшого диаметра и тонкие листы из марки AFK 502 R не поставляются поставять в свободном длинномерном состоянии. Если все же длина важна, рекомендуется выбирать бóльшую толщину или диаметр.

## V.2. Прутки

Марки AFK 502 R – AFK 1 – AFK 18	
Диаметр Ø, мм	Стандартная длина, мм
Ø ≤ 13	2000 ÷ 3000
14 ≤ Ø ≤ 80	3000 ÷ 4000
Ø > 80	Зависит от диаметра и заказанного количества

## V.3. Штампованные поковки и литые заготовки

Для оценки возможности применения просим проконсультироваться с нами.

## VI. ПРИМЕНЕНИЕ

### VI.1. Формоизменение и механическая обработка

Полосы из сплавов AFK можно резать ножницами и вырубать, но из-за низкой пластичности их нельзя подвергать глубокой вытяжке. Однако полосы из сплава AFK 1 можно сгибать.

Для сплавов AFK рекомендуются следующие условия механической обработки:

		AFK 18	AFK 1	AFK 502 R
Токарная обработка	Инструмент	твердосплавный	твердосплавный	твердосплавный
	СОЖ	смазочная эмульсия	смазочная эмульсия	смазочная эмульсия
	Угол резца	10°	8°	10°
	Передний угол	4°	4°	4°
	Скорость резания	50-150 м/мм	55-100 м/мм	50-150 м/мм
Фрезерование	Инструмент	быстрорежущая сталь	быстрорежущая сталь	быстрорежущая сталь
	СОЖ	смазочная эмульсия	смазочная эмульсия	смазочная эмульсия
	Скорость подачи	0,08–0,10 мм/зуб	0,05–0,0 мм/зуб	0,08–0,10 мм/зуб
	Скорость резания	40-150 м/мм	15-150 м/мм	50-150 м/мм

Низкая пластичность этих материалов приводит к тому, что они ведут себя подобно некоторым углеродистым сталям, которые требуют таких же мер предосторожности, например, необходимости избегать механических или тепловых ударов или вибраций большой амплитуды.

## **VI.2. Сварка и пайка твердым припоем**

Сварка и пайка твердым припоем сплава AFK 502 R требует специальных мер предосторожности. Используемые температуры и последующее медленное охлаждение приводят к потере ударной вязкости в переходной зоне вблизи сварного шва вместе со снижением механических свойств. Более того, следует позаботиться о том, чтобы избежать потерь ванадия в виде оксида или нитрата, так как это приводит к дальнейшему снижению пластичности и местному ухудшению магнитных свойств. В действительности, следует избегать по возможности сварки и пайки твердым припоем сплава AFK 502 R. У сплава AFK 1 эти проблемы отсутствуют, поэтому его следует использовать, если такие операции соединения необходимы.

Однако если электроннолучевая сварка технически возможна, это будет решением для преодоления указанных выше трудностей.

В случае пайки твердым припоем необходимо выбрать соответствующий твердый припой, чтобы предотвратить риск коррозионного растрескивания под напряжением, а также проводить пайку детали в полностью свободном от остаточных растягивающих напряжений состоянии. Поэтому детали должны быть предварительно термически обработаны при относительно высокой температуре или отожжены.

## **VI.2. Пайка мягким припоем**

Пайка мягким припоем возможна только для деталей, которые были подвергнуты окончательной термической обработке.

Для обеспечения оптимальных условий пайки важно тщательно вычистить и протравить поверхность. Например, травление хлоридом цинка можно проводить с помощью следующего раствора:

Zn .....	380 г
HCl 22°Bé .....	1000 см <sup>3</sup>