

КАНД. ТЕХН. НАУК ДОЦ.
А. Н. РОЗАНОВ
И
А. И. ДАШКОВСКИЙ

ЗАКАЛКА СПЛАВОВ

МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Канд. техн. наук доц. А.И. Розанов
и А.И. Дашковский

ЗАКАЛКА СПЛАВОВ

Всего - 17 экз
МФО - 17 экз

Дар института

БИБЛИОТЕКА
МИФИ

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	Стр.
Введение.....	1
1. Назначение закалки.....	3
2. Температура нагрева для закалки разных сталей.....	4
3. Среды для охлаждения при закалке.....	6
4. Способы охлаждения.....	14
5. Виды закалки.....	17
6. Прокаливаемость стали.....	20
7. Контроль качества закалки.....	24
8. Закалка бронз.....	25
9. Закалка дуралюмина.....	31
10. Температура нагрева.....	34
11. Выдержка при температура нагрева.....	35
12. Среды охлаждения.....	36
13. Свойства дуралюмина после закалки.....	36
Вакуумная закалка	
Введение.....	38
1. Закалка с нагревом в ампулах.....	38
2. Лабораторный кварцевый прибор для вакуумной закалки.....	41
3. Высокотемпературная печь для вакуумной закалки с индукционным нагревом.....	44
4. Установки для вакуумной закалки с нагревателями сопротивления.....	47
5. Вакуумная закалочная быстрорастворная печь.....	52
6. Закалочные среды.....	55
Литература.....	57
Подписи к фигурам.....	58

ВВЕДЕНИЕ

Термическая обработка, приводящая к фиксации остаточно́й, необычных для низких температур и являющихся либо переохлажденным состоянием со структурой, свойственной высоким температурам, либо промежуточным неустойчивым состоянием, называется закалкой. Закалка производится путем нагрева сплава выше критических точек (температур), выдержки и последующего быстрого охлаждения.

Условием принципиальной возможности или невозможности закалки какого-либо сплава является наличие или отсутствие какого-нибудь фазового превращения в нем при нагревании и охлаждении. Об этом всегда можно судить по виду диаграммы состояния данного сплава.

Закалка технически осуществима только в том случае, если имеется возможность создать такую скорость охлаждения, которая позволит значительно снизить температуру фазового превращения или вовсе подавить его.

Для двойных систем можно по виду диаграммы состояния определить, какие сплавы принципиально способны закаливаться и до какой температуры надо нагревать тот или иной сплав перед закалкой.

В случае тройных систем подобные заключения можно сделать на основании изучения пространственных диаграмм или вертикальных разрезов этих диаграмм.

Обычные углеродистые стали после закалки дают высокую твердость и хорошие режущие свойства, однако эти стали обладают значительной хрупкостью и сравнительно небольшой глубиной прокаливаемости. Последнее объясняется малой устойчивостью их аустенита, в котором, даже при сравнительно больших скоростях охлаждения, успевают пройти превращения при высоких температурах. Поэтому получить высокие механические свойства по всему сечению деталей, как это часто требуется, невозможно.

Закалка стали, в зависимости от температуры нагрева, может быть полной и неполной.

После закалки получается различная структура по сечению изделия. Поверхностный слой углеродистой стали закаливается на мартенсит, последующие слои — на мартенсит с трооститом и другими продуктами распада твердого раствора. После неполной закалки изделия в структуре содержится феррит, если сталь деэвтектоидная, и цементит, если сталь эвтектоидная.

Большое значение для сплава имеет также среда, в которой происходит нагрев, например — защитная или окислительная атмосфера. Практически нагревать детали для закалки можно в атмосфере воздуха или газа, в расплавленных металлах, в расплавленных солях, при помощи электрического тока промышленной или высокой частоты и пр.

Охлаждение при закалке осуществляется различными методами в различных средах: в воде, масле, эмульсии, на воздухе, в расплавленном металле или соли, в свободном состоянии или под штампами, в дулирующей установке или с помощью распылителя пара либо воды.

По характеру охлаждения закалку подразделяют на местную, сквозную, с самоотпуском, поверхностную и др.

В закаленной стали можно получить σ_{σ} порядка 100-200 кг/мм², но так как при этом удлинение и сопротивление удару практически равны нулю, то использовать стали непосредственно в закаленном состоянии не представляется возможным.

Большая хрупкость закаленной стали в значительной мере объясняется внутренними напряжениями, возникающими в процессе охлаждения и превращения аустенита в мартенсит. Поэтому закалка всегда сопровождается отпуском. Меняя температуру отпуска, можно получать в некоторых пределах различные сочетания механических свойств и тем самым удовлетворять различные требования, предъявляемые к стали в зависимости от ее назначения.

1. Назначение закалки

Закалка очень сильно изменяет все свойства стали. После закалки сталь приобретает большую твердость, высокую упругость и незначительную вязкость. Кроме того, закаленная сталь обнаруживает и другие свойства, представляющие большую техническую ценность, например, — режущую способность, повышенное сопротивление истиранию, смятию и вообще деформированию, высокий остаточный магнетизм при большой коэрцитивной силе; легированные стали приобретают повышенную кислотоупорность, антикоррозионность и др.

В практике инструментального дела закалка сталей применяется преимущественно для повышения твердости. Для конструкционных сталей закалка преследует цели улучшения механических свойств: прочности и вязкости (после выскокого отпуска).

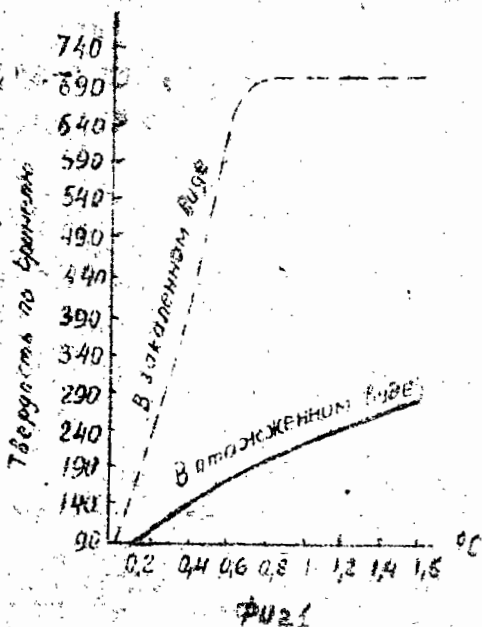
В первом случае закалка является самодевирующей операцией; если за ней следует операция отпуска, то

только для уменьшения напряжений в стали и, следовательно, понижения ее хрупкости, но без снижения твердости.

Во втором случае высокая твердость, создаваемая закалкой, не используется, так как следующий за закалкой отпуск при $400-700^{\circ}$ значительно уменьшает ее. Закалка в этом случае имеет целью не допустить образования грубой структуры при распаде аустенита в верхнем интервале температур.

Сир. 1 показывает влияние углерода на

твердость закаленной и отожженной стали.



2. Температура нагрева для закалки разных сталей

При закалке доэвтектоидной стали температура нагрева перед закалкой должна быть выше температуры конца превращения феррита в аустенит (точка "в" черной или A_{c2}). Это необходимо для достижения наибольшей для данной стали твердости и однородности в закаленном состоянии.

Для получения же более однородного аустенита необходим еще некоторый перегрев.

Наивыгоднейшие температуры нагрева для доэвтектоидных сталей характеризуются кривой, идущей на 30-50° выше линии A_{c_2} .

Для заэвтектоидной стали нагрев выше A_{c_2} приводит к переходу всего цементита в твердый раствор и получению мартенсита после охлаждения. Так как твердость мартенсита ниже твердости цементита, то нагрев выше $A_{цем}$ снижает износостойкость закаленной стали. К тому же после высокого нагрева заэвтектоидных сталей закалка сохраняет значительные количества нераспавшегося аустенита, что понижает твердость металла.

Для сообщения заэвтектоидной стали максимальной твердости необходимо нагревать ее перед закалкой только на 30-50° С выше A_{c_2} . Структура стали, закаленной с 750-780°С, будет состоять из смеси цементита и мелкопластинчатого мартенсита. Цементит при этом сохранится в том виде, в каком он был до закалки, поэтому еще перед ней необходимо иметь весь цементит в зернистой форме¹⁾.

Цементитная сетка и особенно иглы цементита в стали, предназначенной для закалки с 750-780°С, совершенно недопустимы.

Следовательно, наивыгоднейшие температуры нагрева перед закалкой для доэвтектоидных сталей характеризуются кривой, идущей на 30-50°С выше A_{c_2} , а для заэвтектоидных сталей - прямой, идущей выше эвтектоидной линии на 30-50°С (фиг. 2).

1) Наилучшая форма цементита - зернистая.

3. Среди для охлаждения при закалке

При закалке сталей требуется неодинаковая скорость охлаждения во всем интервале температур. В районе температур от A_1 и до 650° скорость превращения аустенита мала, поэтому сталь можно охлаждать медленно, но не настолько медленно, чтобы произошло превращение аустенита.

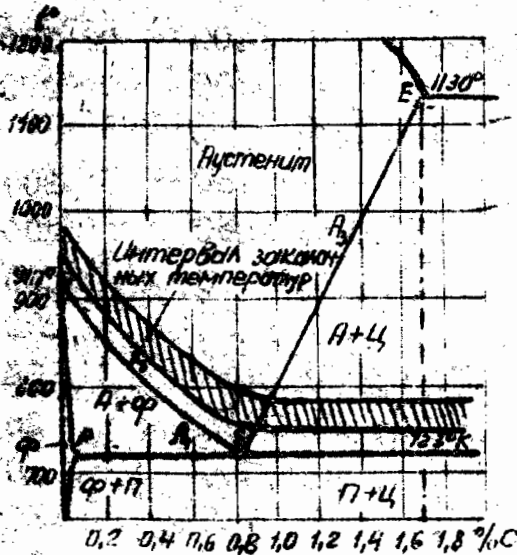


Fig. 2

Ниже 400° имеется область относительной устойчивости аустенита и охлаждение в данном случае может быть замедленным. В интервале превращения аустенита в мартенсит желательно медленное охлаждение.

Интервал $650-400^\circ$ должен быть пройден быстро, так как аустенит в этом интервале менее устойчив.

Ниже 400° имеется область относительной устойчивости аустенита и охлаждение в данном случае может быть замедленным. В интервале превращения

Таблица 1

Скорость охлаждения стали в различных закалочных средах

Закалывающая среда	Скорость охлаждения (град/сек в интервале темпер.)	
	550-650°	200-300°
1	2	3

Вода при 18°
Вода при 26°

600

270

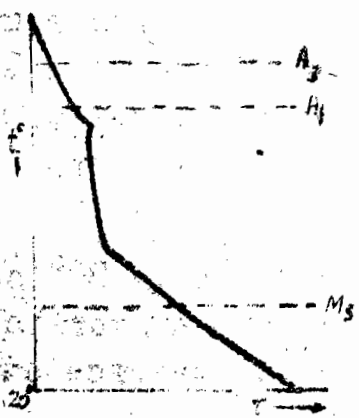
500

270

6

723-100

	1	2	3
Вода при 50°		100	270
Вода при 74°		30	200
Раствор в воде при 15° едкого натра (10%)		1200	300
Раствор в воде при 15° поваренной соли (10%)		1100	300
Раствор в воде при 15° соли (10%)		800	270
" " " серной кислоты (10%)		750	300
Дистиллированная вода		250	200
Эмульсия масла в воде		70	200
Мыльная вода		30	200
Минеральное машинное масло		150	30
Трансформаторное масло		120	25
Сплав 75% Sn ; 25% Cd ($t \approx 175^\circ$)		450	50
Ртуть		500	130
Медные плиты		60	30
Железные плиты		35	15



Фиг. 3

Идеальная кривая охлаждения при закалке показана на фиг. 3.

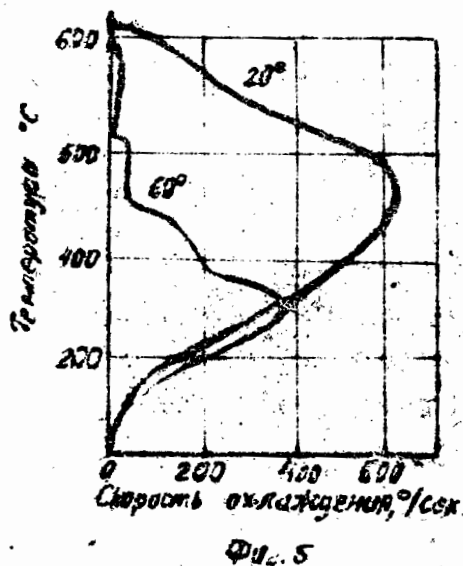
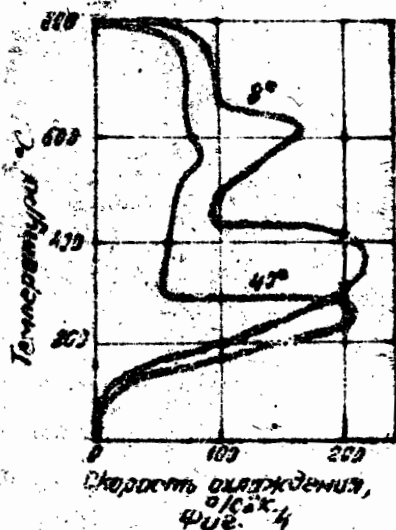
Желательно, чтобы закалочная среда в районе 600° С охлаждала быстро, а в районе 300° - медленно.

Табл. 1 показывает скорость охлаждения стали в двух интервалах температур в различных закалочных средах.

Самым распространенным закалочным охладителем является вода, представляющая наиболее энергичный и дешевый охладитель.

Из табл. 1 видно, что скорость охлаждения в воде в интервале $650-550^{\circ}$ может колебаться в пределах от $1200^{\circ}/\text{сек}$ (вода с 10% едкого натра) до 30 град/сек (мыльная вода).

Особенностью воды, как охладителя, является вы-



Фиг. 5

сокая скорость охлаждения в начале мартенситного интервала ($300-200^{\circ}$). Эта скорость колеблется в пределах $300-270$ град/сек. Даже мыльная вода, дающая в верхнем интервале незначительную скорость охлаждения, равную 30 град/сек, в нижнем интервале дает скорость 200 град/сек.

При повышении температуры воды свыше 30° закалывающее действие воды резко понижается, хотя скорость охлаждения в мартенситном интервале остается очень высокой.

Закалывающая способность воды в зависимости от ее

температура показана на фиг. 4 и 5.

В зависимости от количества примесей, растворенных в воде, закаливательное действие ее может быть повышено или понижено.

Дистиллированная вода дает меньшую скорость охлаждения и более мягкую закалку, чем обыкновенная питьевая вода.

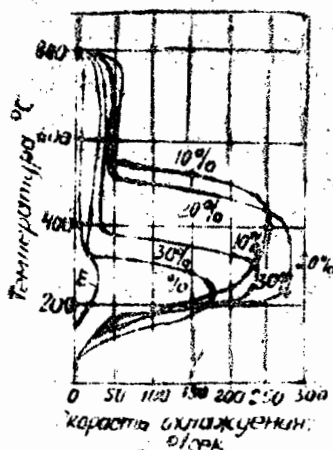
При наличии растворенных в воде газов ее охлаждающее действие еще более снижается. Кроме того, вода, насыщенная газами, дает очень неравномерное охлаждение, и на поверхности закаленного изделия появляются мягкие незакаленные пятна. Поэтому вода, уже применявшаяся для закалки или прокипяченная, потерявшая растворенные в ней газы, закаливает лучше, чем свежая вода.

Для смягчения закаливающего действия воды и приближения ее как закаливающей среды к маслу, добавляют в воду глицерин, жидкое стекло и известковое молоко. Для закалки инструментальной углеродистой стали рекомендуется вода с добавлением 10-20% глицерина.

Наилучший способ уменьшить закаливающую способность воды для приближения ее действия к закаливающему действию масла - добавление к воде масляных эмульсий в количестве нескольких десятых процента (0,2-0,5%). Однако при любых добавлениях скорость охлаждения в мартенситном интервале остается высокой: 200-300°/сек.

Закаливающая способность эмульсий воды и масла с различным содержанием последнего в воде показана графически на фиг. 6. Влияние температуры ванны на охлаждающую способность 10%-ной масляной эмульсии иллюстрируется фиг. 7.

Другой, весьма распространенной, закалывающей средой являются масла — растительные и минеральные.



Фиг. 6.

Охлаждающая способность масел в 3-4 раза меньше, чем воды (фиг. 8).

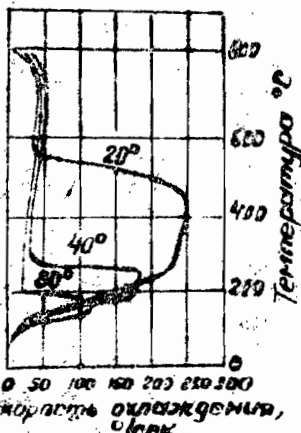
Преимущество масел, по сравнению с водой, состоит в том, что они дают, медленное охлаждение в мартенситной зоне, вследствие чего закалка вызывает меньшую деформацию, меньшие напряжения и меньшую

склонность изделия к закалочным трещинам.

Второе преимущество масел — постоянство их закалывающего действия в пределах 20-100°C (фиг. 9).

Сравнение охлаждающей способности различных сред показано в табл. 2.

Однако масла, как закалочные среды, имеют ряд существенных недостатков. Они изменяют свои свойства под влиянием высокой температуры закалываемых изделий, а также вследствие окислительного действия атмосферы. Вязкость масла меняется, оно густеет и его закалывающая способность уменьшается. Растительные масла разлагаются и загустевают быстрее, чем минеральные масла.



Фиг. 7.

Кроме того, масла обладают способностью возгораться при повышении их температуры. К закалочным маслам предъявляется требование, чтобы температура возгорания их была не ниже 180°C.

Закаливающая жидкость

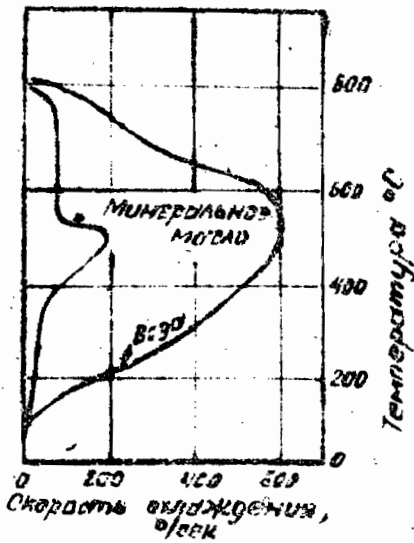
: Относительная
: скорость охла-
: дения при 650-
: 5500 °С

Вода при 20°	1
Вода при 40°	0,67
Вода при 60°	0,46
Вода при 80°	0,24
5%-ный раствор поваренной соли в воде при 20°С	1,1
5%-ный раствор едкого натра в воде при 20°С	1,19
Растительное масло	0,15-0,30
Минеральное масло	0,21-0,44
Животный жир	0,19-0,35

После закалки в масляной ванне на поверхности изделия остается темный пригар, являющийся следствием разложения нестойких составных частей масла. Если удалить из масла эти нестойкие части путем специальной обработки, получается так называемое светлоклящее масло. После закалки в нем изделия, нагретые в нейтральной атмосфере, сохраняют свою блестящую полированную поверхность.

Характеристики масел, применяемых для закалки и отпуска сплавов, даны в табл. 3.

Масла	вязкость в 100°С	Температура вспышки в °С	Температура застывания в °С	Максимальная температура при нагревании в °С
Валор	5,5-7,0	310	-	260
Висковин	3,0-4,0	240	-	200
Дистиллат 6	4,5-6,0	300	-	250
Веретенное 2	2,0-2,2	165	-30	60
Веретенное 3	2,8-3,2	170	-30	60
Автол 4	3,5-4,0	180	-30	60
Машинное Л	4,0-4,5	180	-15	60
Машинное С	5,5-7,0	190	-10	60



В качестве слабых охладителей можно применять жидкий свинец и его сплавы с оловом, цинком, кадмием и сурьмой. Ввиду высокой температуры (значительно выше температуры мартенситного превращения) ванны из расплавленных металлов могут применяться только для переохлаждения аустенита в целях ступенчатой или изотермической закалки.

Для ступенчатой или изотермической закалки можно пользоваться ваннами из расплавленных солей

(главным образом, азотнокислых и хлористых, а также их смесей). Скорость охлаждения в расплавленных солях несколько меньше, чем в расплавленных металлах.

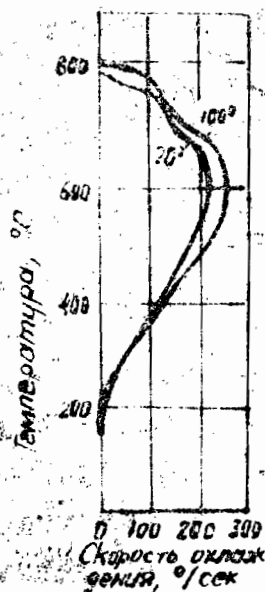


Рис. 9

Способ охлаждения — обрызгивание поверхности мелкими брызгами под высоким давлением — так называемое дутьевое охлаждение.

Характеристика солей, применяемых для закалки, дается в табл. 4.

Таблица 4

Соли	Температура плавления, °C	Температура при изменении, °C
55% KNO_3 + 45% $NaNO_2$	187	150-400
55% KNO_3 + 45% $NaNO_3$	218	230-500
$NaNO_2$	317	325-600
KNO_3	387	350-600
75% KOH + 25% NaOH	140	150-500

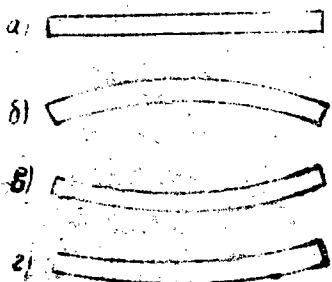
Эти соли можно применять и для спуска сплавов.

4. Способы охлаждения

При сложной форме термически обрабатываемого изделия нужно специально выбирать условия охлаждения, потому что сложная и неодинаковая в сечении деталь очень склонна к концентрации внутренних напряжений и к короблению.

Для стали с большим содержанием углерода надо тщательнее подбирать условия охлаждения при закалке, так как такая сталь обладает большими объемными изменениями при превращении.

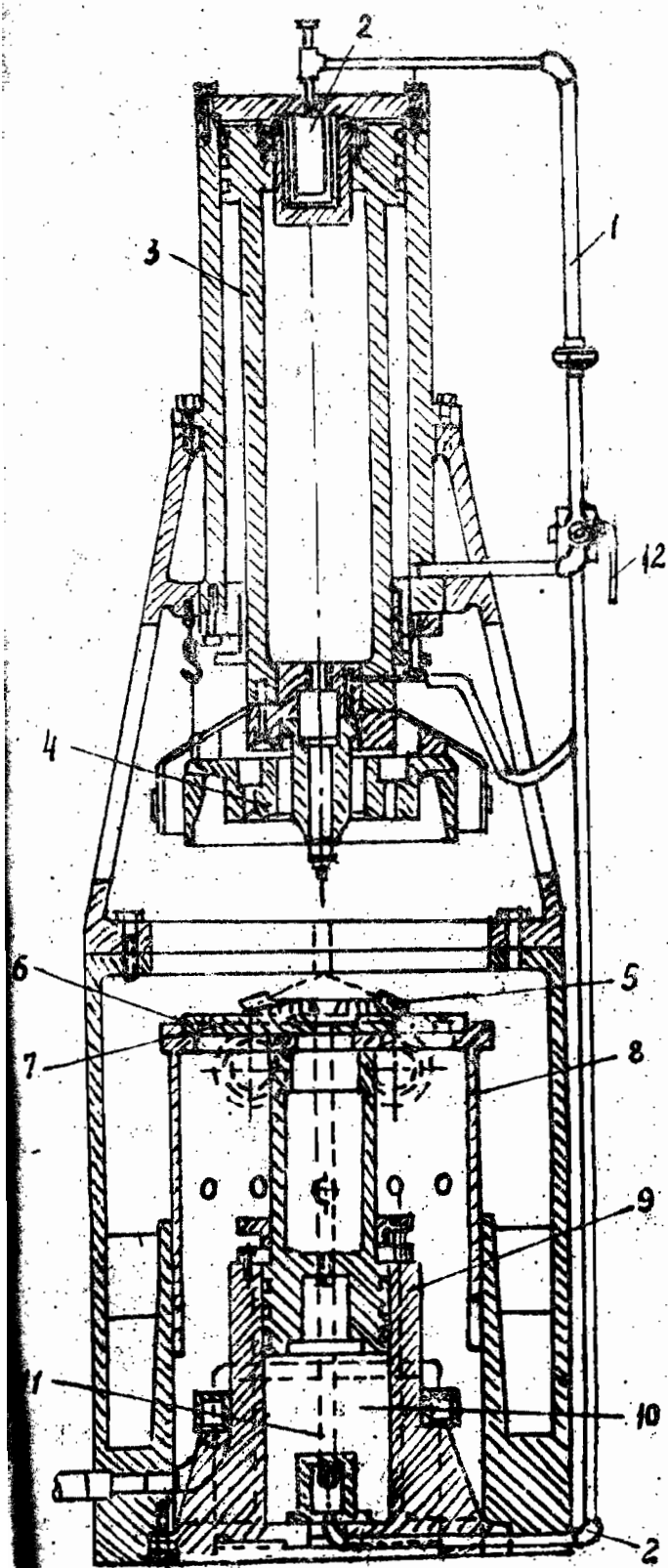
Поэтому выбор способов погружения детали в закалочную жидкость имеет важное значение. Плоские, вытянутые в одном направлении детали следует погружать вертикально, так как при таком способе все четыре стороны будут охлаждаться одинаково. Если же такую деталь погружать плашмя, то в первый момент нижние слои



Фиг. 10

будут термически сжиматься и изделие прогнется вверх, а в следующий момент в нижних слоях произойдет мартенситное превращение со значительным расширением этих слоев и изделие изогнется в обратную сторону. Когда вся деталь погружена в закалочную ванну, мартенситное превращение произойдет и в верхних слоях, но вызванное им расширение не сможет выпрямить брусок, так как встретит сопротивление прочных мартенситных слоев в нижней части изделия. (фиг. 10).

Для изделий больших размеров и сложной формы применяют специальные прессы. На фиг. 11 показан пресс для закалки зубчатых колес и ободов.



Верхний и нижний штампы прессы поднимаются и опускаются под действием сжатого воздуха. В исходном положении нижний штамп расположен выше уровня масла, налитого в бак. Нагретую деталь помещают на нижний штамп, после чего по воздухопроводу 1 подает воздух под давлением 6-7 ат в пространство 2 над поршнем 3. Поршень вместе с верхним штампом 4 опускается вниз и входит в соприкосновение с деталью - зубчатым колесом 5, находящимся на нижнем штампе 6. При этом центрирующий конус входит в отверстие зубчатого колеса, разжимные кулачки 7,

... на определенное давление, сцентрируют
... колесо и в тот же момент верхний штамп прижмет
... к плоскости нижнего штампа и выправит по плоскости.
При этом не требуется больших усилий, так как металл зуб-
чатого колеса, нагретый выше верхней критической точки,
имеет достаточную пластичность.

В захватном состоянии под давлением около 2 т зубчатое
колесо опускается в циркулирующее масло, где и охлажда-
ется. При опускании нижнего штампа стол 8 и поршень 9
вытесняют из цилиндра 10 воздух, выходящий по трубке 11
через кран 12. Погружение совершается в течение несколь-
ких секунд. Приток масла происходит по трубке под давле-
нием. Для подъема нижнего штампа воздух, с помощью пере-
ключения крана 12, поступает по трубке в цилиндр нижне-
го стола.

Для охлаждения валиков применяют специальные устрой-
ства.

Для закалки плоских деталей, толщиной не более
2-3 мм, применяют способ охлаждения, совмещенный с прав-
кой. Нагретая под закалку деталь переносится под штамп,
в нижней и верхней половинках которого находятся элемен-
ты сопротивления, проходя по которым электрический ток
нагревает штампы до определенной температуры, соответ-
ствующей температуре отпуска детали (например, 450°С).

Деталь, нагретая под закалку, будучи зажата между
штампами, вследствие пластичности выправляется и охлаж-
дается до температуры штампа, после чего охлаждается
в воде до комнатной температуры. Твердость ее соответ-
ствует твердости закаленной и отпущенной при 450°С де-
тали. Коробления деталей при этом не происходит, они
остаются выправленными в штампе.

5. Виды закалки

1. Закалка в одном охладителе - наиболее простой вид закалки. При этом способе погруженная в охладитель деталь остается там до полного охлаждения.

2. Закалка с подстуживанием заключается в том, что нагретую деталь не сразу погружают в закалочную жидкость, а некоторое время выдерживают на воздухе - подстуживают.

3. Закалка в двух средах - 1-й вариант заключается в том, что деталь сначала охлаждают в быстроохлаждающей среде, затем переносят в медленноохлаждающую среду. Обычно первым охладителем является вода, а вторым - масло. Недостаток этого способа - трудность регулирования выдержки в воде. При излишней выдержке деталь охладится ниже мартенситной точки с большой скоростью, что приведет к образованию трещин и к короблению.

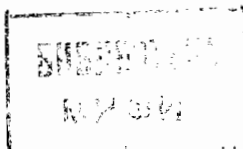
4. Закалка в двух средах - второй вариант - заключается в том, что одна часть детали калится в одной среде, а затем вся деталь погружается в другую среду.

Примером может служить закалка полуосей автомобиля, когда фланцы закаливаются в масле, а затем вся полуось - в горячей воде. При этом недодержка в масле вызывает трещины во фланце.

5. Закалка с самоотпуском. Охлаждается в воде только рабочая часть детали или инструмента; вынутая затем из воды, она нагревается за счет тепла той части детали, которая не была погружена в воду.

Можно закалить в воде всю деталь. Затем разогревают в соляной или свинцовой ванне нерабочую часть до высокой температуры и, используя теплоотдачу, разогревают и рабочую часть инструмента.

Степень разогрева и в том и в другом случае определяется по цветам побежалости. Порядок появления цветов



побежалости таков:

- 220° - светложелтый,
- 240° - темножелтый,
- 255° - желто-коричневый,
- 265° - красновато-коричневый,
- 275° - пурпурно-коричневый,
- 285° - фиолетовый,
- 296° - васильково-синий,
- 310° } - светлосиний,
- 315° } -
- 325° } - серый.
- 330° }

Получение цветов побежалости требует чистой (полированной, шлифованной) поверхности деталей.

Твердость рабочей части определяется при данном содержании углерода в стали цветом отпуска. Например, синий цвет отпуска (побежалости) характеризует более низкую твердость, чем фиолетовый и т.д.

б. Ступенчатая закалка. Деталь охлаждается в закалочной среде, имеющей температуру выше мартенситной точки для данной стали. При охлаждении и выдержке в данной среде закаливаемое изделие приобретает одинаковую температуру по всему сечению; после этого следует медленное охлаждение, во время которого происходит превращение аустенита в мартенсит. При такой закалке получаются наименьшие внутренние напряжения.

Ступенчатую закалку целесообразно применять к деталям, закаливающимся в воде и имеющим небольшие сечения. Для деталей, закаливаемых в масле, такой способ мало эффективен.

В качестве закалывающей среды применяют расплавленные соли (см. табл. 4). Та или иная соль выбирается в зависимости от температуры "ступеньки".

7. Изотермическая закалка. При изотермической закалке закалочная среда имеет температуру несколько выше маргенистой точки для данной стали, и деталь выдерживается столько времени, сколько требуется для того, чтобы успело закончиться изотермическое превращение аустенита. Закаленная таким образом сталь обладает высокой твердостью ($R_c = 40-50$), повышенной вязкостью и малыми внутренними напряжениями.

8. Закалка струйчатая. Заключается в обрызгивании поверхности детали мелкими брызгами под высоким давлением. Этот способ употребляется тогда, когда, вследствие большой толщины изделия, обыкновенная закалка в воде не дает достаточно быстрого охлаждения. Существует струйчатая закалка с промежуточным купанием.

9. Закалка в прессах и аппаратах без изгиба деталей описана выше.

10. Закалка в гибочных прессах отличается от предыдущего вида закалки тем, что деталь при закалке в пресс деформируется и охлаждается в изогнутом виде (закалка рессорных листов и некоторых пружин).

11. Закалка местная, т.е. закалка части детали (режущая часть инструмента и т.д.).

12. Закалка сквозная, дающая одинаковую твердость по всему сечению. Она применяется только для деталей из углеродистой стали малого сечения и для легированных сталей.

13. Закалка полная. Нагрев стали для закалки производится выше верхних критических точек. Сталь перед закалкой состоит из одного аустенита.

14. Закалка неполная. Сталь нагревается ниже верхней критической точки, но выше нижней - A_c . В этой области, кроме аустенита, находятся равновесные фазы - феррит и цементит. При охлаждении аустенитные участки

перейдут в мартенсит, а феррит и цементит останутся неизменными.

15. Закалка с последующей обработкой холодом. Во многих сортах стали в закаленном состоянии содержится повышенное количество остаточного аустенита в силу того, что конец мартенситного превращения лежит значительно ниже нуля. Охлаждение такой стали ниже 0°C вызывает дополнительное образование мартенсита.

6. Прокаливаемость стали

От прокаливаемости стали зависят ее механические свойства. Прокаливаемость характеризуется глубиной, на которую сталь может быть закалена на мартенсит, и зависит от многих факторов.

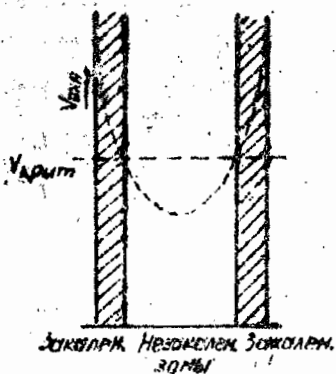
Закаливаемость стали характеризуется максимальным значением твердости, приобретенной сталью в результате закалки. Закаливаемость зависит от содержания углерода в стали. В табл. 5 показана зависимость твердости мартенсита от содержания углерода.

Таблица 5

Марки стали	Микротвердость мартенсита H_V	Твердость стали R_c
20	427	37,5
35	695	53,7
45	729	54,2
У5	999	62,4
У8	1108	64,6
У10	1123	63,9
У12	1160	64,1
1,5%С	1324	38,0

х) Среднее значение из семи замеров

Насквозная прокаливаемость детали объясняется тем, что при закалке изделий сердцевинные слои охлаждаются сравнительно медленно. Скорость охлаждения распределяется по сечению, как показано на фиг. 12. Если критическая скорость охлаждения равна величине, показанной на этой схеме горизонтальной линией, то изделие не прокалится насквозь, и глубина закалки будет равна заштрихованному слою (фиг. 12).

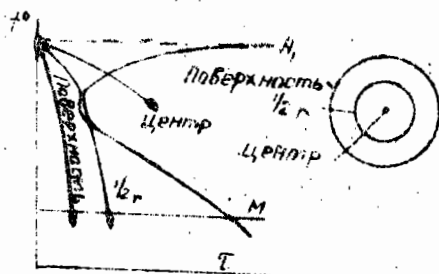


Фиг. 12

Чем меньше критическая скорость охлаждения, тем глубже прокаливаемость.

Прокаливаемость также тесно связана со скоростью превращения аустенита в перлит и, следовательно, с расположением кривой начала превращения в С-диаграмме.

Схематические кривые охлаждения центра, поверхностных слоев и сечения, расположенного на половине радиуса от поверхности цилиндрического образца, показаны наложенными на С-диаграмму на фиг. 13. Для данной стали при данных условиях охлаждения получится в поверхностных слоях мартенситная структура, в центре — перлитная, на расстоянии половины радиуса — мартенсит и троостит.

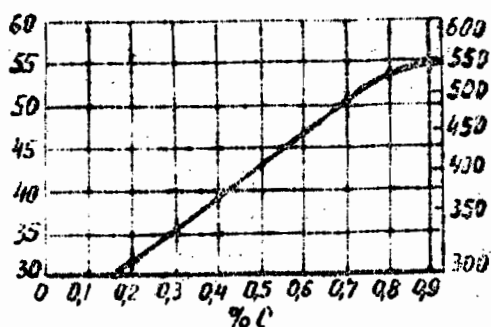


Фиг. 13

Если С-кривая отодвинется вправо, то, очевидно, увеличится прокаливаемость. Значит, все факторы, которые снижают скорость аустенитно-перлитного превращения, способствуют углублению прокаливаемости.

За глубину прокаливаемости принимают расстояние от поверхности до слоя с полумартенситной структурой, т.е. слоя, где структура состоит из 50% мартенсита и 50% троостита, так как определить границу чисто мартенситной зоны практически трудно, а полумартенситную зону легко определить по микроструктуре и еще проще - по твердости. Если твердость мартенсита равна M единицам, а твердость троостита N , то твердость полумартенситной зоны будет равна $\frac{M+N}{2}$.

Так как твердость мартенсита и троостита зависит только от содержания углерода, то и твердость полумартенситной зоны есть функция только содержания углерода.



Фиг. 14

На фиг. 14 приведен график твердости полумартенситной зоны в зависимости от содержания углерода в стали.

Прокаливаемость можно определить путем измерения твердости или рассмотрения структуры в поперечном сечении закаленных образцов.

ных образцов.

На фиг. 15 показано распределение твердости по поперечным сечениям серии цилиндрических образцов разных диаметров из эвтектоидной стали, закаленных в воде. Только образцы диаметром 25 мм и меньше имеют после закалки высокую твердость в центре.

Наибольший диаметр образца, при котором еще получается сплошная прокаливаемость, называется критическим диаметром.

Образцы, обладающие диаметром больше критического, после закалки будут обнаруживать в центре пониженную

Твердость.

Прокаливаемость стали можно определить и методом торцевой закалки. Этот метод заключается в охлаждении цилиндрического образца с торца, вследствие чего по его длине получается различная скорость охлаждения, а следовательно, и различная интенсивность закалки по высоте образца. Изменение твердости по высоте образца позволяет определить прокаливаемость стали.

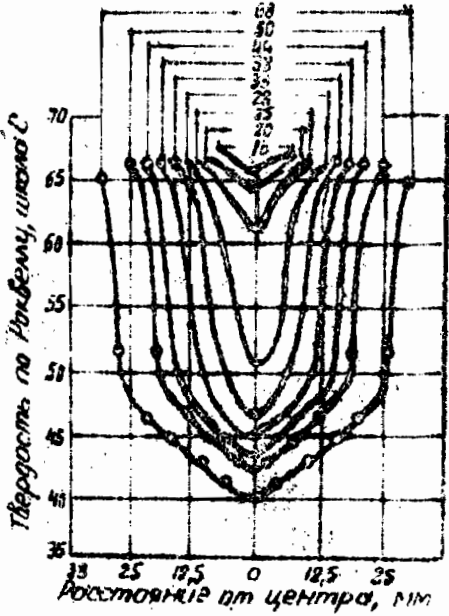


Рис. 15

Схема устройства для торцевого метода определения прокаливаемости и размер образца приводятся на рис. 16.

Стали одной марки из-за колебаний в составе, различий в размерах зерна и т.д.

недья характеризовать одной линией и поэтому прока-

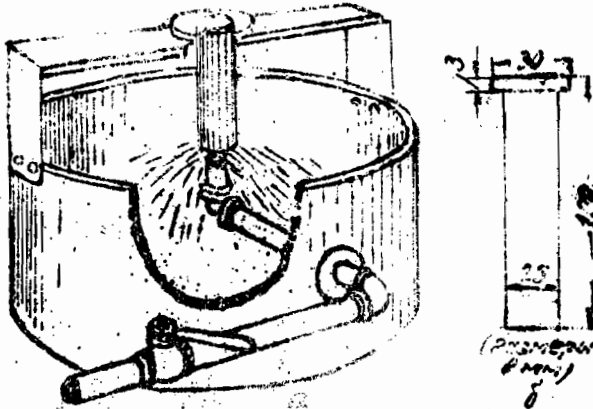
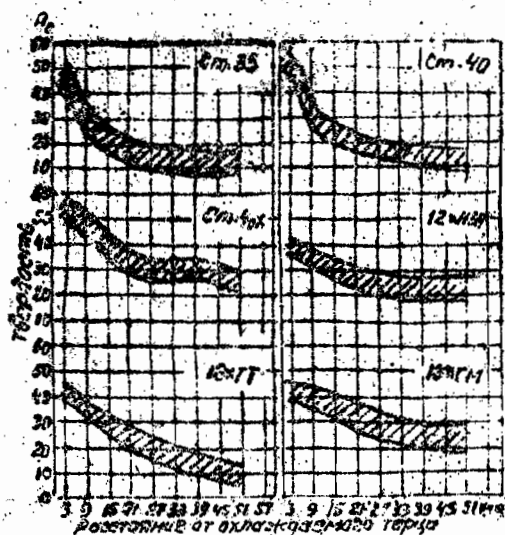


Рис. 16

ливаемость дается как полоса прокаливаемости на диаграмме в координатах: расстояние от закаливаемого торца - твердость.



Фиг. 17

На фиг. 17 приводят-ся полосы прокаливаемости для некоторых марок стали.

7. Контроль качества закалки

В результате закалки возможно возникновение различных видов брака. Наиболее распространенные виды - это недостаточная твердость, повышенная хрупкость, мягкие пятна, обезуглероживание и окисление поверхности, деформация и трещины.

1. Недостаточная твердость закаленного изделия определяется путем измерения твердости. Она объясняется недогревом, недостаточной выдержкой при температуре закалки или недостаточно интенсивным охлаждением.

В первом случае пониженную твердость закаленного изделия устраняют повышением температуры печи или удлинением выдержки в ней. Во втором случае следует применить более интенсивное охлаждение.

2. Образование мягких пятен определяется путем измерения твердости и является следствием тех же при-

чин; методы устранения - такие же, как рассмотренные выше.

Иногда мягкие пятна появляются вследствие неоднородности исходной структуры. В этом случае перед закалкой следует провести нормализацию с целью получения более однородной структуры.

3. Повышенная крупность может быть обнаружена механическими испытаниями или по излому, или же по микроструктуре. Повышенная крупность появляется в результате закалки с более высокой, чем требуется, температуры. Она устраняется повторной закалкой с нормальной температуры.

4. Окисление и обезуглероживание поверхности всегда сопутствуют нагреву в пламенных или электрических печах без контролируемой атмосферы. Для устранения этого дефекта следует пользоваться печами с контролируемой искусственной атмосферой или же нагревать деталь в ящике с чугунной стружкой либо с древесным углем, что устраняет обезуглероживание и сводит окисление к минимуму.

Можно производить нагрев в солях, что тоже предохраняет от окисления и обезуглероживания.

5. Деформации и коробления обнаруживает проверкой шаблонами или даже по наружному осмотру; трещины обнаруживает осмотром, проверкой изделий в специальных дефектоскопах различных конструкций. Коробление и поводку можно устранить последующей рихтовкой или правкой.

Трещины являются непоправимым браком.

8. Закалка бронз

По химическому составу бронзы можно разделить на:

1) оловянистые бронзы - простые и специальные с добавками цинка и свинца; 2) алюминиевые - простые и специальные с добавками железа, марганца, никеля; 3) свинцовые.

отна ; 4) кремнистые и 5) бериллиевые.

Согласно диаграмме состояния закалку могут принимать оловянистые бронзы с содержанием олова от 2 до 14% (в зависимости от исходного состояния), алюминиевые бронзы с содержанием Al больше 9%, кремнистые бронзы до 5,3% Si .

Закалка медных сплавов не дает особенно резких и ценных с практической точки зрения изменений свойств, по крайней мере для наиболее распространенных сплавов.

Так, в практике не применяется закалка (с последующим отпуском) оловянистых бронз, несмотря на то, что из диаграммы состояния $Cu-Sn$ следует, что олово имеет ограниченную растворимость в меди, значительно изменяющуюся с понижением температуры. Однако, в силу крайней медленности процессов диффузии в этих сплавах, граница растворимости может резко перемещаться в зависимости от скорости охлаждения и последующей обработки.

Свинцовистые бронзы используются как антифрикционные сплавы, применяются в литом состоянии в виде вкладышей или для заливки подшипников и втулок и термически не обрабатываются.

Простейшие алюминиевые бронзы с пониженным содержанием Al (5-7%) вообще невозможно подвергать закалке, поскольку они не имеют фазовых превращений в твердом состоянии.

Бронзы с повышенным содержанием Al (выше 9%), в особенности с добавками Fe и Ni , способны улучшать свои механические свойства в результате закалки и последующего отпуска, так как они имеют фазовые превращения в твердом состоянии. Эти бронзы содержат в структуре эвтектоид $\alpha + \beta$, полученный в результате распада β -фазы при $570^{\circ}C$ (фиг. 18).

В результате быстрого охлаждения β -фаза переохлаждается и распад ее сопровождается образованием более

дисперсных $\alpha + \gamma$ -частиц.

Сходство термической обработки алюминиевых бронз со

сталью дополняется тем, что при охлаждении с критической скоростью β -фаза превращается в игольчатую структуру. Это превращение происходит по мартенситному типу.

Твердость и электросопротивление Al -бронз при закалке с температур выше 570° резко падает, так как смесь $\alpha + \gamma$ заменяется однородным β -раствором. Происходящее же при более высоких температурах растворение α -фазы в β -фазе, наоборот, сопровождается некоторым ростом твердости и электросопротивления. Таким образом,

при закалке с высоких температур алюминиевые бронзы могут несколько повышать свою твердость.

На рис. 19 даны кривые твердости пяти различных Al -бронз в зависимости от температуры закалки.

- Кривая 1в относится к бронзе с 9,77% Al
- " 2в " " к бронзе с 10,24% Al
- " 3в " " к бронзе с 10,87% Al
- " 4в " " к бронзе с 11,78% Al
- " 5в " " к бронзе с 12,15% Al

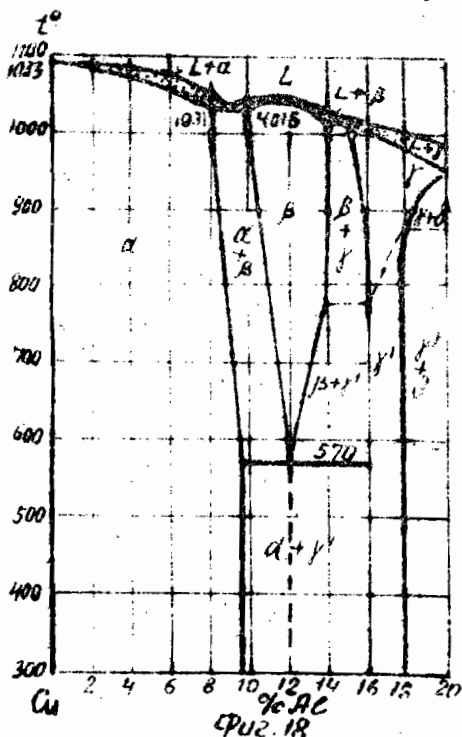


Рис. 18

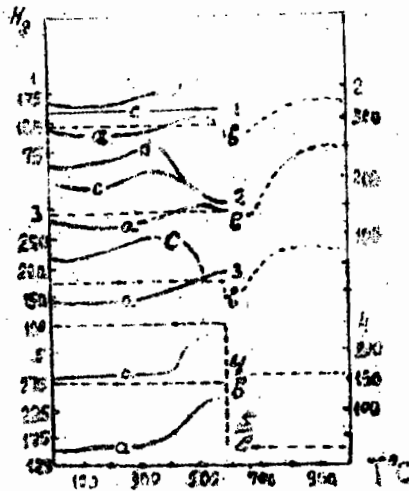


Рис. 19

Бронзы БРАЖ-9-4 применяются для трущихся деталей, работающих при высоких нагрузках и больших скоростях, и для литья арматуры. Для повышения пластичности литой бронзы рекомендуется ее закалка в воде 650°C (или нормализация).

Алюминиевожелезомарганцовая бронза БРАЖиц-10-3-1,5 (часто называется БАЖМ) применяется в литом или горяче-обработанном виде для ответственных деталей в специальном машиностроении. Для повышения пластичности литой бронзы рекомендуется закалка в воде 650°C (или нормализация).

Алюминиевожелезоникелевые бронзы (БАЖН) обладают высокими механическими свойствами при комнатной и при высокой температуре.

После закалки с 920°C в воде (выдержка 1,5 часа) и последующего отпуска при 650°C в течение двух часов БРАЖН-10-4-4 дает $\sigma_{\text{в}} = 65 \text{ кг/мм}^2$; $\delta = 5\%$;
 $H_{\text{в}} = 200-240$.

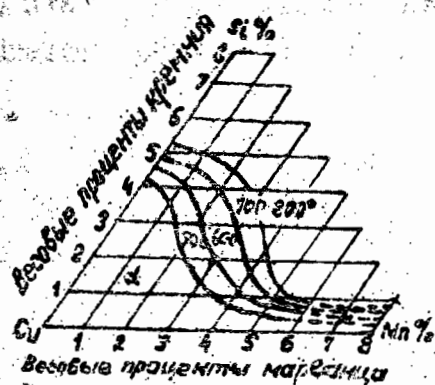
Медноалюминиевожелезоникелевые сплавы без железа (куниаль) с 2-5% Al и 5-15% Ni могут быть отнесены к алюминиево-никелевым бронзам.

Сплавы с 2-4% Al и 10-12% Ni , предварительно прокатанные в горячем и холодном состоянии, после закалки с 900°C дают $\sigma_{\text{в}} = 25-30 \text{ кг/мм}^2$.

Диаграмма состояния кремнистых бронз показана на фиг. 20. Растворимость кремния в меди при температуре 800°C достигает 5,3%. С понижением температуры растворимость уменьшается. Переход $(\alpha + \kappa)$ и κ - фаз в $\alpha + \gamma$ протекает при температуре 552° . Добавки марганца и никеля резко сдвигают границу насыщения области твердого раствора α в сторону меньшего углерода. В связи с этим кремнистая бронза с никелем под влиянием термической обработки, в результате выделения дисперсных силицидов никеля, чрезвычайно сильно упрочняется.

Бронза БрКН-1-3 обладает очень высокими механиче-

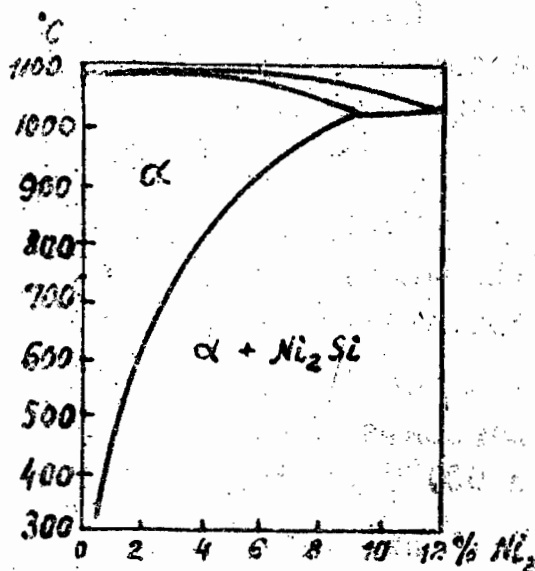
скими свойствами и коррозионной стойкостью. Способна воспринимать термическую обработку — закалку в воде с 875°C (выдержка 2 часа) и отпуск при $410-475^{\circ}\text{C}$ в течение 1,5-2 часов. Механические свойства после термической обработки: $\sigma_B \geq 50 \text{ кг/мм}^2$; $\delta_B \geq 15\%$; $H_B = 130-180 \text{ кг/мм}^2$.



Фиг. 20

Корзон нашел, что в тройных системах Cu-Ni-Si и Cu-Co-Si сплавы разрезом $\text{Cu-Ni}_2\text{Si}$ и $\text{Cu-Co}_2\text{Si}$ ведут себя, как простые двойные сплавы. При этом силициды никеля и кобальта оказываются сравнительно хорошо растворимыми в твердой меди при высоких температурах и очень плохо — при низких (фиг. 21).

Отсюда следует возможность заковки и отпуска этих сплавов. Сплав меди с 8% силицида Ni после заковки имеет твердость около 80 по Бринелю.



Фиг. 21

Для сплава меди с 2,5% Be после заковки и отпуска происходит повышение твердости со 100 до 400 по Бринелю (фиг. 22). Насколько сильно меняются другие механические свойства при термической обработке разных меднобериллиевых сплавов, видно из табл. 6.

С о с т а в

2% Be : 2,5% Be : 3% Be
 98% Cu : 97,5% Cu : 97% Cu
 Cu

Предел упругости (0,003% удл.):

в отожженном виде	12,8	21,4	-
в закаленном виде	6,2	5,0	9,1
в закаленном и отпущенном виде	25,0	45,9	54,2

Предел текучести (0,2% удл.):

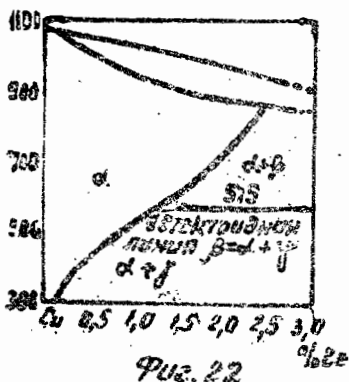
в отожженном виде	12	31	32
в закаленном виде	11	16	20
в закаленном и отпущенном виде	74	128	133

Сопротивление разрыву:

в отожженном виде	55	66	68
в закаленном виде	51	49	56
в закаленном и отпущенном виде	87	135	150

Удлинение:

в отожженном виде	22	21	23
в закаленном виде	46	52	24
в закаленном и отпущенном виде	4	0,8	1,0



Фиг. 22

Закалка сама по себе делает металл мягче, но при распаде закаленного твердого раствора повышение прочности может достигать значений

$\sigma_s = 150 \text{ кг/мм}^2$. На фиг. 23 показано, в какой мере твер-

дость различных меднобериллиевых бронз меняется в зависимости от времени отпуска при 350° после закалки с 800°C .

Соотав, режимы термической обработки и свойства бериллиевой бронзы БрБ-2 приводятся в табл. 7.

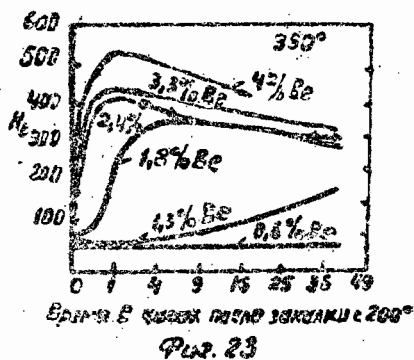


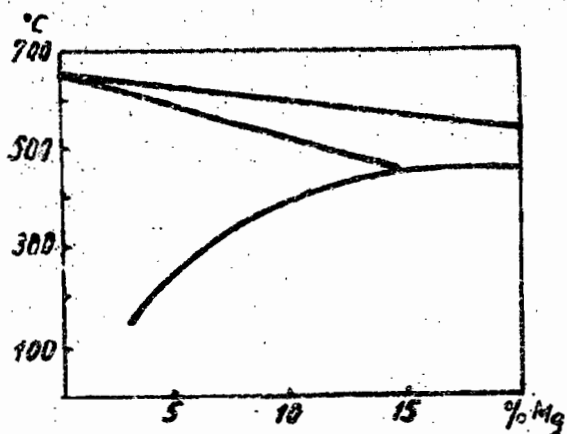
Таблица 7

Марка	% Be	Термическая обработка	Механич. свойства		
			σв	β%	Hв
			кг/мм²		
БрБ-2	2,0-2,3	Закалка с 800° в воде	50	30	100
		Закалка и старение при 325°	120	1	370

9. Закалка Дуралюмина

В настоящее время к группе дуралюминов относят все многокомпонентные обрабатываемые сплавы системы $Al-Cu-Mg$ и $Al-Cu-Mg-Si$ как с добавлением марганца, так и без него. Медь, магний и марганец вводят преднамеренно. Кремний и железо являются случайными примесями, однако, вредной примесью является толь-

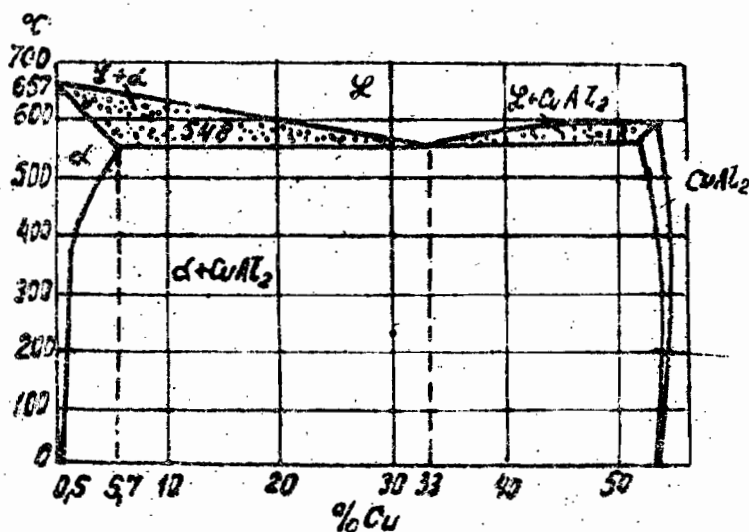
но железу. Возможность термической обработки дуралюмина вытекает из самого вида диаграмм состояния важнейших двойных систем входящих в его состав элементов.



Фиг. 24

На фиг. 24 и 25 показаны части диаграмм состояния этих систем, относящихся к сплавам, богатым алюминием.

Возможность термообработки дуралюмина можно проследить на изменении растворимости меди в алюминии при нагреве.



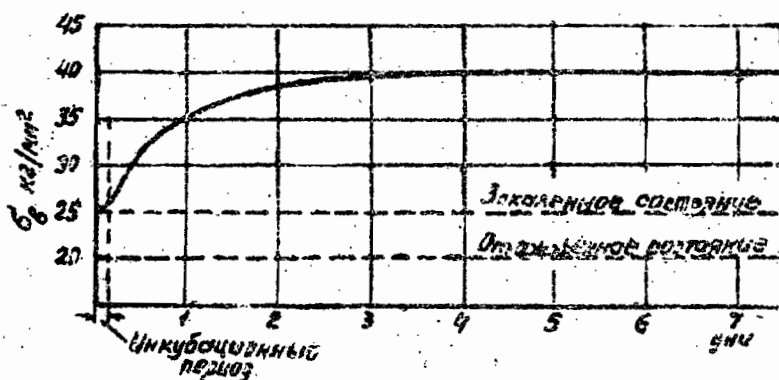
Фиг. 25

Медь растворяется в алюминии при комнатной температуре в количестве примерно 0,5%, а максимальная растворимость при эвтектической температуре 548°C равна 5,7%.

Любой сплав, содержащий от 0,5 до 5,7% меди, может быть путем нагрева переведен в однофазное состояние, т.е. вторичные кристаллы соединения $CuAl_2$ можно

перевести в α -твердый раствор (фиг. 25) Это состояние фиксируется быстрым охлаждением. Получается неустойчивый пересыщенный твердый раствор, в котором происходит обратный процесс выделения CuAl_2 ¹⁾. В конечном итоге в растворе остается равновесное количество меди, равное 0,5%.

Этот процесс называется старением. Если процесс происходит при комнатной температуре, то старение называется естественным; при искусственно повышенной температуре происходит искусственное старение.



Фиг. 26

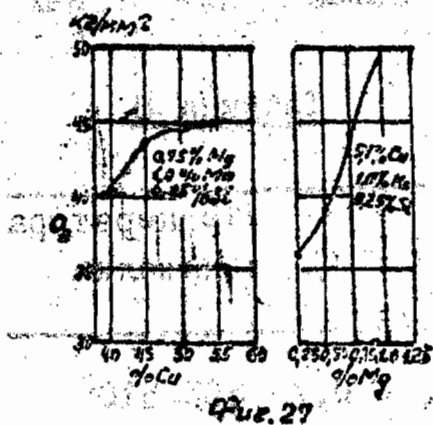
В свежезакаленном состоянии предел прочности дуралюмина с 4% меди составляет примерно 25 кг/мм^2 , а после старения — 40 кг/мм^2 , т.е. предел прочности сильно возрастает.

Типичный ход кривой упрочнения при естественном старении приведен на фиг. 26.

Первые 2-3 часа после закалки характеризуется весьма слабым повышением прочности. Этот период называется инкубационным. Он имеет важное технологическое значение, так как в этот период сплав обладает большой способностью к пластической деформации, и закаленные изделия могут подвергаться различным технологическим операциям, связанным с деформацией (расклёпка заклепок, гибка, отбортовка и т.д.).

1) Точнее — твердый раствор алюминия в CuAl_2

Цель закалки - получить легко деформируемый дуралюмин, упрочняющийся после проведения технологической операции. Влияние меди и магния на механические свойства дуралюмина показано на фиг. 27.



Фиг. 27

10. Температура нагрева

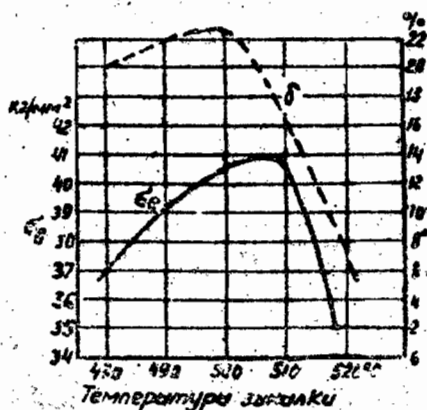
Повышение температуры нагрева для закалки ведет к растворению интерметаллических соединений и к получению после закалки более пересыщенного твердого раствора, более энергичного старения и в конечном результате - более высокой прочности.

Однако повышение температуры имеет предел, нагрев выше которого приводит к росту зерна, окислению, оплавлению границ зерна. Это вызывает катастрофическое падение прочности и пластичности.

Механические свойства дуралюмина в закаленном и состаренном состоянии в зависимости от температуры закалки приведены на фиг. 28.

Таким образом, очень важно при закалке дуралюмина точно соблюдать температурный режим. Колебание температуры закалки не должно превышать $\pm 2 - 3^\circ$.

Для каждой марки дуралюмина имеется своя температура закалки, которая установлена экспериментально.



Фиг. 28

В табл. 8 приведены температуры закалки для разных марок дуралюмина.

Таблица 8

Марка сплава	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Температура закалки
Д1	3,6-4,8	0,4-0,8	0,4-0,8	≤ 0,7	≤ 0,7	505-510°
Д6	4,6-5,2	0,65-1,0	0,6-1,1	≤ 0,7	≤ 0,7	
Д16	3,8-4,9	1,2-1,6	0,3-0,9	≤ 0,5	≤ 0,5	495-502°
ДЭП	2,6-3,5	0,3-0,7	0,3-0,7	≤ 0,5	≤ 0,5	490-500°
Д18	2,2-3,0	0,2-0,5	0,2	≤ 0,5	≤ 0,5	

11. Выдержка при температуре нагрева

При температуре закалки необходимо давать выдержку, обеспечивающую растворение избыточной фазы и гомогенизацию твердого раствора. В случае недостаточной температуры закалки или недостаточной выдержки при температуре закалки остаются нерастворенными, помимо включений марганцевой и железной составляющих, и более крупные частицы медных составляющих (Al_2Cu , Al_3Cu , Mg_2Cu и $Al_3Cu_2Mg_2$).

Табл. 9 показывает, насколько изменение температуры закалки и времени выдержки влияет на свойства дуралюмина. Таблица составлена для дуралюмина с 4,5% Cu и 0,6% Mg.

Таблица 9

Время выдержки, мин.	475-480°		490-500°		500-510°	
	σ кг/мм ²	δ %	σ кг/мм ²	δ %	σ кг/мм ²	δ %
5	37-38	20-22	38-39	20-22	39-40	20-22
10	38-39	20-24	39-40	22-23	40-42	20
20	39-40	20-22	40-41	23-24	41-42	20-23

Большое значение имеет деформация образца перед закалкой. Чем сильнее был деформирован образец, тем выше механические свойства его и тем короче время выдержки при температуре закалки. Это явление объясняется уничтожением грубой структуры и измельчением зерна в результате деформации. Наибольшие механические свойства получаются после деформации в 80-90% и выше.

12. Среда охлаждения

Дуралюмин при закалке необходимо охлаждать со скоростью, обеспечивающей фиксирование высокотемпературного структурного состояния.

Практически для закалки применяется вода.

Температура закалочной среды оказывает некоторое влияние на конечные свойства дуралюмина. Обычный дуралюмин, закаленный в воде при 0°C с температуры 500°, дает после старения сопротивление разрыву 44 кг/мм² и удлинение 23%; при закалке в воде при 50° получается

$\sigma_{\epsilon} = 42 \text{ кг/мм}^2$ и $\delta = 24\%$, при закалке в воде при 100° получаются $\sigma_{\epsilon} = 39-40 \text{ кг/мм}^2$ и $\delta = 25-26\%$.

13. Свойства дуралюмина после закалки

Закаленные изделия из дуралюмина обладают пластичностью, деформируемостью и сохраняют эти свойства в течение 2-3 часов после закалки (инкубационный период). После этого начинается старение, прочностные характеристики повышаются, а пластические - снижаются. Химическая стойкость после закалки резко увеличивается.

Механические свойства и некоторые характеристики дуралюмина различных марок приводятся в табл. 10.

Марка	Температура °С	Состояние сплава		δ	κГ/мм ²	Н _В	Упроч- ни- тели	
		от- пуска	отжига					
Д1	495-505 ком- нат- ная	-	Отожженный	18-22	5-11	50-60	$CuAlE_2, S$	
		-	Закаленный	18-25	9-17	70-80		
		-	Закаленный и со- старенный при 20°	15-20	22-25	38-42	90-100	$Mg_2 Si$
Д17	490-505	-	Отожженный	18	10-11	50	$CuAlE_2, S$	
		-	Закаленный и со- старенный при 20°С	18	20-24	38-42	50	$Mg_2 Si$
		-	Отожженный	18-20	5-11	18-25	50-60	$CuAlE_2, S$
Д6	498-505	350-400	Закаленный	18-22	21-28	90-105		
		-	Закаленный и ис- кусственно соста- ренный при 150°	8-15	44-50	30-38	95-125	$Mg_2 Si$

ВАКУУМНАЯ ЗАКАЛКА

В в е д е н и е

В последние годы в связи с быстрым ростом промышленности находят все большее применение металлы и сплавы, обладающие высокой температурой плавления. Эти металлы при высоких температурах интенсивно окисляются на воздухе, жадно поглощают кислород и растворяют его, что всегда отрицательно сказывается на их свойствах и в ряде случаев является недопустимым.

Современное состояние науки и техники позволяет успешно преодолевать эти трудности. Так, плавление, отливка, закалка и другие виды обработки, связанные с нагреванием, проводятся в вакууме или в атмосфере нейтральных газов.

Для нагревателей в высокотемпературных печах применяют платину, графит, молибден, тантал, вольфрам.

Огнеупорными материалами при температуре до 1600° служат фарфор, шамот и кремнезем при температуре до 1800° - глинозем и окись магния; для более высоких температур применяют окись циркония, карборунд, графит, окись бериллия и др.

1. Закалка с нагревом в ампулах

Простейшим способом нагрева в атмосфере нейтрального газа или в вакууме является нагрев в ампулах.

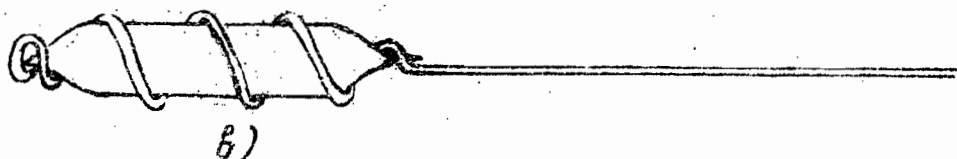
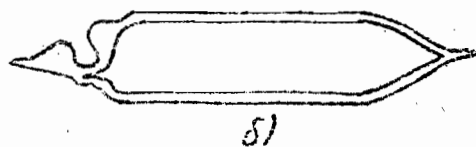
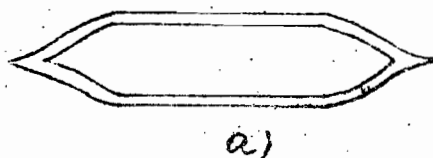
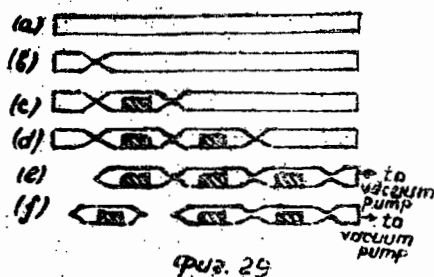
Способ этот состоит в том, что образцы, предназначенные для закалки, закладываются в ампулу, эвакуированную или наполненную инертным газом. Ампулы изготовляются из жароупорного стекла или из кварца. Эти ампулы можно нагревать в любой нагревательной печи.

В одной ампуле возможно производить нагрев нескольких образцов.

Для построения диаграмм состояния часто бывает необходимым проводить длительные отжижки. При этом нагревать

несколько образцов в одной ампуле можно только в тех случаях, когда есть полная уверенность в том, что не будет происходить взаимодействия металла образцов. Например, в сплавах алюминий-серебро для образцов, богатых серебром, взаимодействие между ме-

таллом образцов может происходить уже при температуре 650°C .



Фиг. 30

В таких случаях каждый образец следует отжигать в отдельной запаянной трубке или ампуле, длина которой выбирается такой, чтобы при запайке не происходило недопустимого нагревания образца.

На фиг. 29 показаны последовательные этапы запайки образцов при большом их количестве.

На концах ампул необходимо обеспечить одинаковую толщину стенок, особенно в местах отпая (фиг. 30).

Неровности при запайке приводят к растрескиванию стекла даже при очень малых скоростях нагрева, поэтому такие ампулы следует изымать.

Ампулы из кварца запаиваются таким же образом, однако коэффициент расширения кварца настолько мал, что ампулы, подобные изображенным на фиг. 30-б, можно применять без риска растрескивания.

Многие сплавы взаимодействуют со стеклом или кварцем при повышенных температурах. Так, алюминиевые сплавы в кусках "забирают" определенные количества кварца при нагреве в ампулах выше 550°C , а порошки тех же сплавов - даже при температуре 500°C .

В этом случае защитой при небольших температурах могут служить трубки из окиси алюминия, которые помещаются внутрь ампул, а образцы располагаются внутри трубки. Использование трубок из окиси алюминия для защиты образцов непрактично выше 1100°C , так как окись алюминия реагирует с кварцем. Этого можно избежать, если помещать образец в трубку из окиси алюминия, обернутую тонкой фольгой какого-нибудь высокотемпературного металла, например молибдена.

Указанный метод хорош при нагреве, но не пригоден при охлаждении, так как обертка образца препятствует металлу контактировать с охлаждающей жидкостью.

Во многих случаях образец можно оборачивать металлической фольгой без трубки из окиси алюминия, но только тогда, когда не происходит сплавления между образцом и фольгой при высокой температуре.

Еще лучше вставлять внутрь кварцевой ампулы, вместо обертки, сплетенную из проволоки корзинку, достаточно густую, чтобы образец не соприкасался с кварцем.

При не очень высоких температурах стеклянную ампулу можно обвязать нихромовой проволокой (фиг. 30-в).

с помощью которой вынимают ампулу из печи и погружают в воду. Стеклоанная ампула немедленно лопается. Кварцевые же ампулы следует брать специальными щипцами и раздавливать под водой либо разбивать железным пестом.

В случае длительных выдержек образцов при температурах выше 1000°C следует наполнять ампулы очищенным нейтральным газом, например аргоном, для предотвращения сплющивания ампул атмосферным давлением. Газ вводится в ампулу после откачки ее перед запайкой и его давление подбирается с таким расчетом, чтобы при температуре нагрева оно было близким к атмосферному.

2. Лабораторный кварцевый прибор для вакуумной закалки

Простейший лабораторный прибор для термической обработки металлов и сплавов под вакуумом представляет собой кварцевую трубку, запаянную с одного конца и имеющую два конических шлифа на другом конце. Одним из этих шлифов трубка соединяется с кварцевым резервуаром для охлаждающей жидкости, другим - с системой стеклянных трубопроводов, идущих к вакуумному насосу.

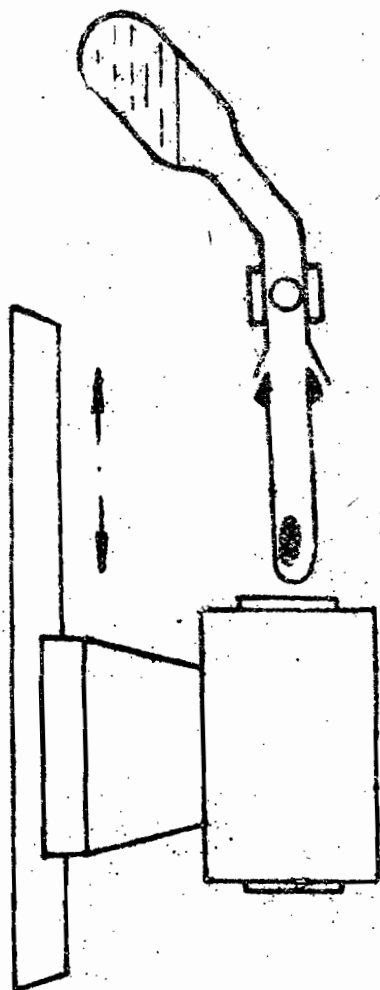
Схема такой установки приведена на фиг. 31, а общий вид установки - на фиг. 32.

Кварцевую трубку вместе с резервуаром можно поворачивать на шлифе, соединяющем ее с вакуумной системой. В рабочем положении трубка расположена горизонтально.

Нагревательная печь установлена на направляющих, по которым ее возможно передвигать так, что в одном крайнем положении печи трубка оказывается совершенно свободной, а в другом крайнем положении она полностью находится в рабочем пространстве печи.

Работа на приборе производится следующим образом.

при снятом резервуаре с закалочной жидкостью в трубку помещают образец. Затем присоединяют резервуар с за-



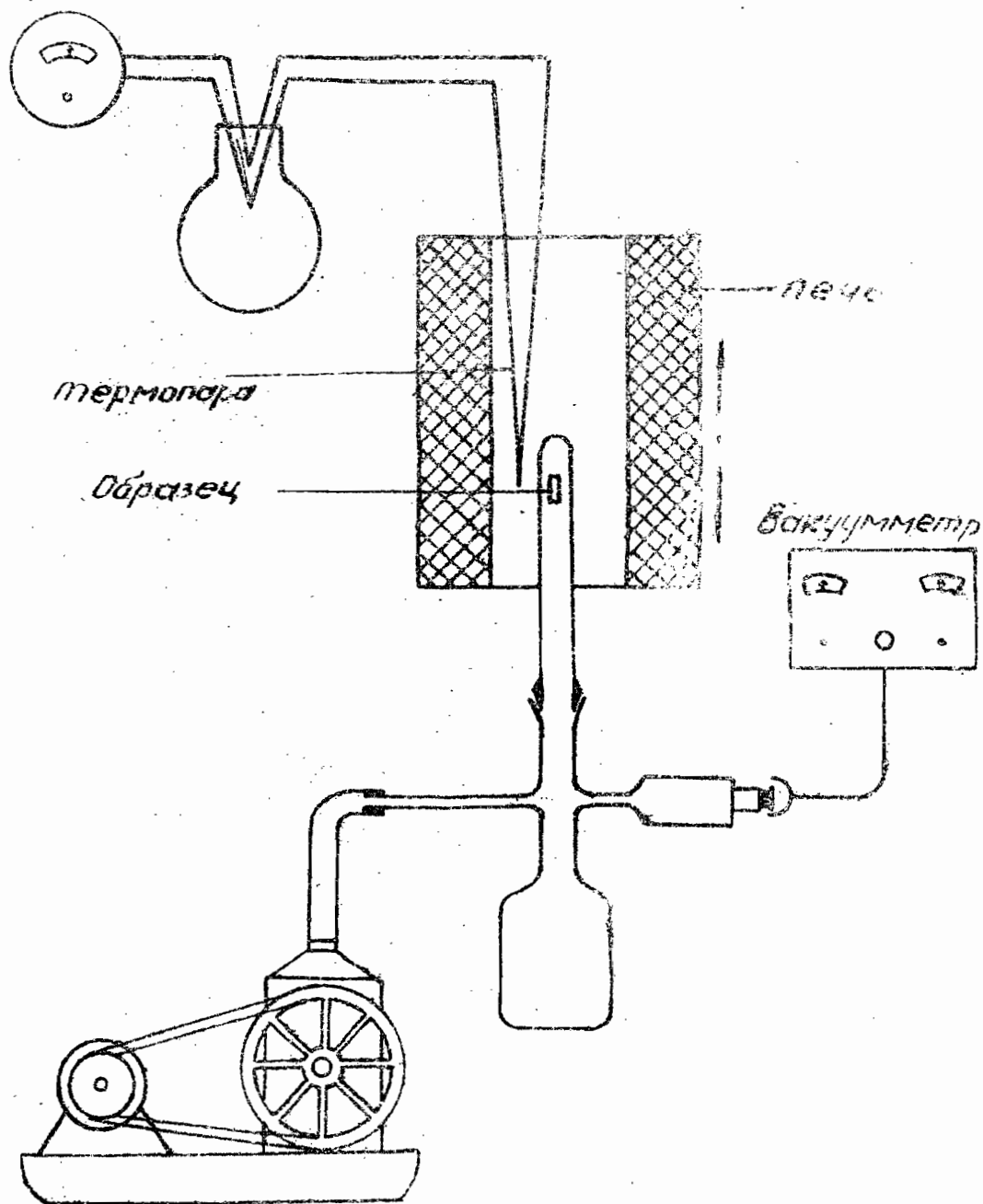
Фиг. 31

калочной жидкостью, устанавливает трубку в горизонтальное положение и включают вакуумные насосы. Потом на трубку надвигают печь и включают нагрев. Когда трубка с образцом нагреется до нужной температуры и будет проведена соответствующая выдержка при этой температуре, печь с трубки сдвигают в сторону, а трубку с резервуаром поворачивают запаиванным концом вверх до тех пор, пока образец не соскользнет из трубки в резервуар с маслом. После этого перекрывают кран, отключая насосы и пускают в прибор воздух. Затем снимают резервуар с жидкостью и извлекают с помощью пинцета или небольших щипцов закаленный образец. Если позволяют размеры прибора и закаливаемых образцов, можно производить одновременно закалку нескольких образцов.

Описанный прибор работает при температурах до 1000°C . При этом можно рекомендовать помещение образца внутри корзинки из тугоплавкого металла или трубки из окиси алюминия, как и при использовании кварцевых ампул.

Для контроля температуры применяется платино-платинородиевая термопара, вставляемая в рабочее пространство печи с противоположной стороны до соприкосновения с кварцевой трубкой.

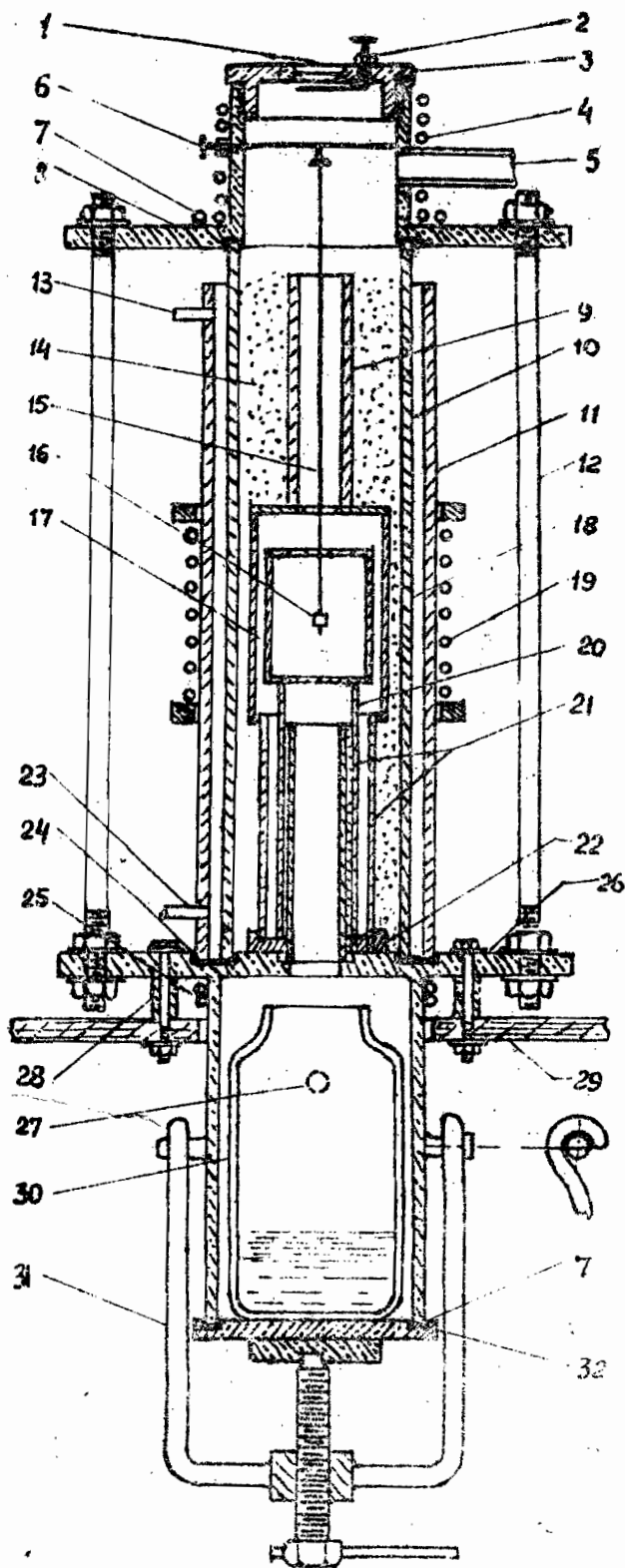
При хорошо выполненных деталях вакуумной системы и



Фиг. 32

надежно притертых шлифовых соединениях в описываемом приборе, можно получить достаточно глубокий вакуум порядка 10^{-4} мм ртутного столба. Измерение вакуума производится при помощи манометрической лампы ЛТ-2 и термопарного вакуумметра.

3. Высокотемпературная печь для вакуумной ваналки с индукционным нагревом



Фиг. 33

Для термической обработки образцов металлов и сплавов при высоких температурах и быстрого охлаждения с этих температур сконструированы специальные вакуумные установки.

Основной особенностью такой установки является вольфрамовая или танталовая нагревательная камера, поддерживаемая тремя вольфрамовыми (или танталовыми) стержнями внутри труб из окиси циркония.

Общий вид установки представлен на фиг. 33.

Образец подвешивается внутри нагревательной камеры на вольфрамовой проволоке, которая закрепляется в верхней части установки в специальном зажиме. Зажим можно разжимать извне с помощью соот-

отстаивающего устройства. Снизу нагревательная камера имеет отверстие, переходящее далее в вертикальную трубу, ведущую к находящемуся в нижней части установки резервуару с маслом. Сверху нагревательная камера закрыта вольфрамовой крышкой с отверстием, через которое внутрь камеры вводится образец.

Наружные стенки камеры изготовлены из жароупорного стекла и представляют собой два цилиндра, вставленные один внутрь другого, между которыми пропускается охлаждающая вода.

На наружный цилиндр надета индукционная катушка.

Пространство между наружной стеклянной стенкой и трубой, в которой находится нагревательная камера, заполнено теплоизолирующей массой — порошком из окиси циркония 35-60 меш.

Верхняя часть установки закрыта крышкой на резиновой прокладке. В этой крышке имеется окно для измерения температуры образца оптическим пирометром и зажим для проволоки, на которой подвешивается образец. Окно закрывается заслонкой, отодвигаемой в сторону во время наблюдения.

Высокочастотный генератор мощностью до 20 ква позволяет разогревать нагревательную камеру до температуры, при которой уже начинает оплаиваться труба из окиси циркония, т.е. до 2700°C .

Установки такого типа, имеющие нагревательную камеру, сделанную из графита, а не из вольфрама, при той же изоляции из окиси циркония, позволяют получать температуры до 3000°C . Однако при такой температуре углерод "летит" настолько интенсивно, что атмосфера в нагревательной камере насыщается углеродом и образцы реагируют с атомарным углеродом весьма заметным образом уже при температурах выше 2200°C . Поэтому конструкции с графитовой нагревательной камерой почти не применяются.

Образец разогревается как за счет токов индукции, так и за счет излучения тепловой энергии от стенок нагревательной камеры.

Для помещения образца в установку следует снять крышку и укрепленный на вольфрамовой проволоке образец подвесить внутри нагревательной камеры, закрепив другой конец проволоки в захиме. После этого крышка устанавливается на место, затем включаются вакуумные насосы. По достижении вакуума порядка 10^{-4} мм ртутного столба включается индукционный нагрев.

При нагреве образца и деталей установки происходит усиленное выделение газа, и вакуум ухудшается до значений порядка 10^{-3} мм ртутного столба. Во время выдержки при заданной температуре вакуум снова улучшается. После необходимой выдержки образца раскрывают захим, в котором закреплена проволока, поддерживающая образец, и последний вместе с проволокой падает в стоящий внизу стакан с закалочной жидкостью.

Затем установку охлаждают, выключая при этом вакуумные насосы, но не наполняя камеру воздухом. Когда установка охладится до температуры не выше 300°C , открывают поддон камеры и из закалочного стакана извлекают образец. После установки стакана и поддона на место установка снова готова к загрузке нового образца.

Иногда для уменьшения времени, необходимого для охлаждения печи, пропускают через нагревательную камеру нейтральный газ - обычно гелий или аргон.

Установка с индукционным нагревом применяется в основном для закалки образцов, не требующих продолжительной выдержки при температуре закалки, так как регулирование температуры здесь затруднено и длительное поддержание температуры на заданном уровне оказывается сложным.

4. Установки для вакуумной закалки с нагревателями сопротивления

Вследствие того, что индукционные установки, описанные выше, обладают относительно коротким периодом нагревания и не допускают точного регулирования температуры, сконструированы установки, в которых нагревателем служат элементы сопротивления. Эти установки предназначены для продолжительного нагрева при температурах, достигающих 1900°C . При включении обмотки нагревания через стабилизатор напряжения и вариак возможно поддерживать температуры в пределах $\pm 3^{\circ}\text{C}$ в течение длительного периода при температуре в пределах от 1100° до 1900°C .

Конструктивно такие установки могут быть оформлены различно, но большого принципиального различия между ними нет. Поэтому мы рассмотрим только два варианта такой установки: 1) установку с кварцевым колпаком и с теплоизолирующим заполнителем, 2) установку с металлическим колпаком и с экранировкой нагревателя.

Схема установки первого рода представлена на фиг. 34.

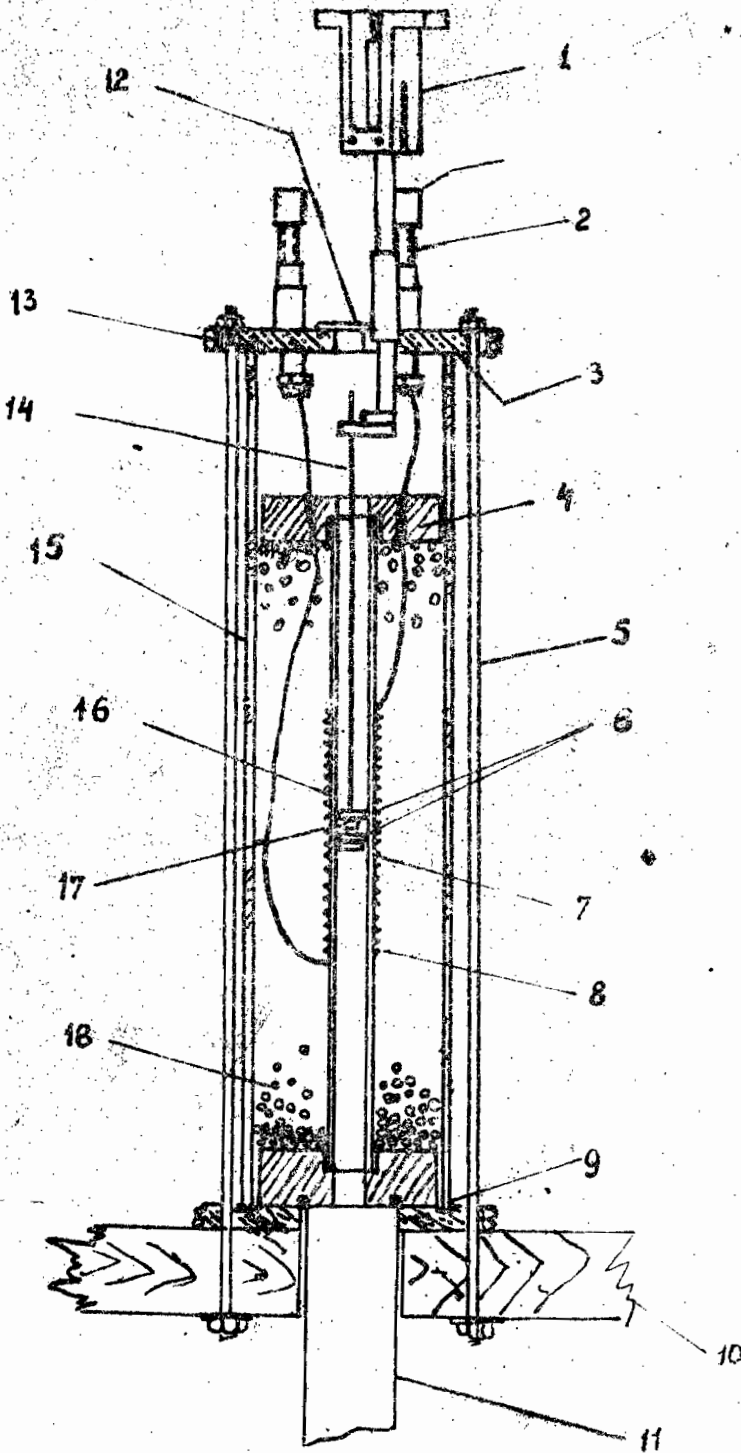
Установка состоит из центральной трубы, на которой намотан нагреватель, и из наружного кварцевого цилиндра с верхней и нижней металлическими крышками.

Для работы при температурах до 1900°C применяется в качестве материала для трубы окись бериллия, а нагреватель делается из молибденовой проволоки.

В частности, в описываемой установке нагреватель имеет 52 витка из молибденовой проволоки диаметром 0,63 мм, намотанных на трубе диаметром 25 мм. Расстояние между витками - 8,4 мм.

Пространство между центральной трубой и наружным кварцевым цилиндром заполнено порошком окиси бериллия (BeO) 40-80 меш.

Образец подвешивается в рабочем пространстве печи на вольфрамовой проволоке, конец которой закрепляется в зажиме, открываемом извне.



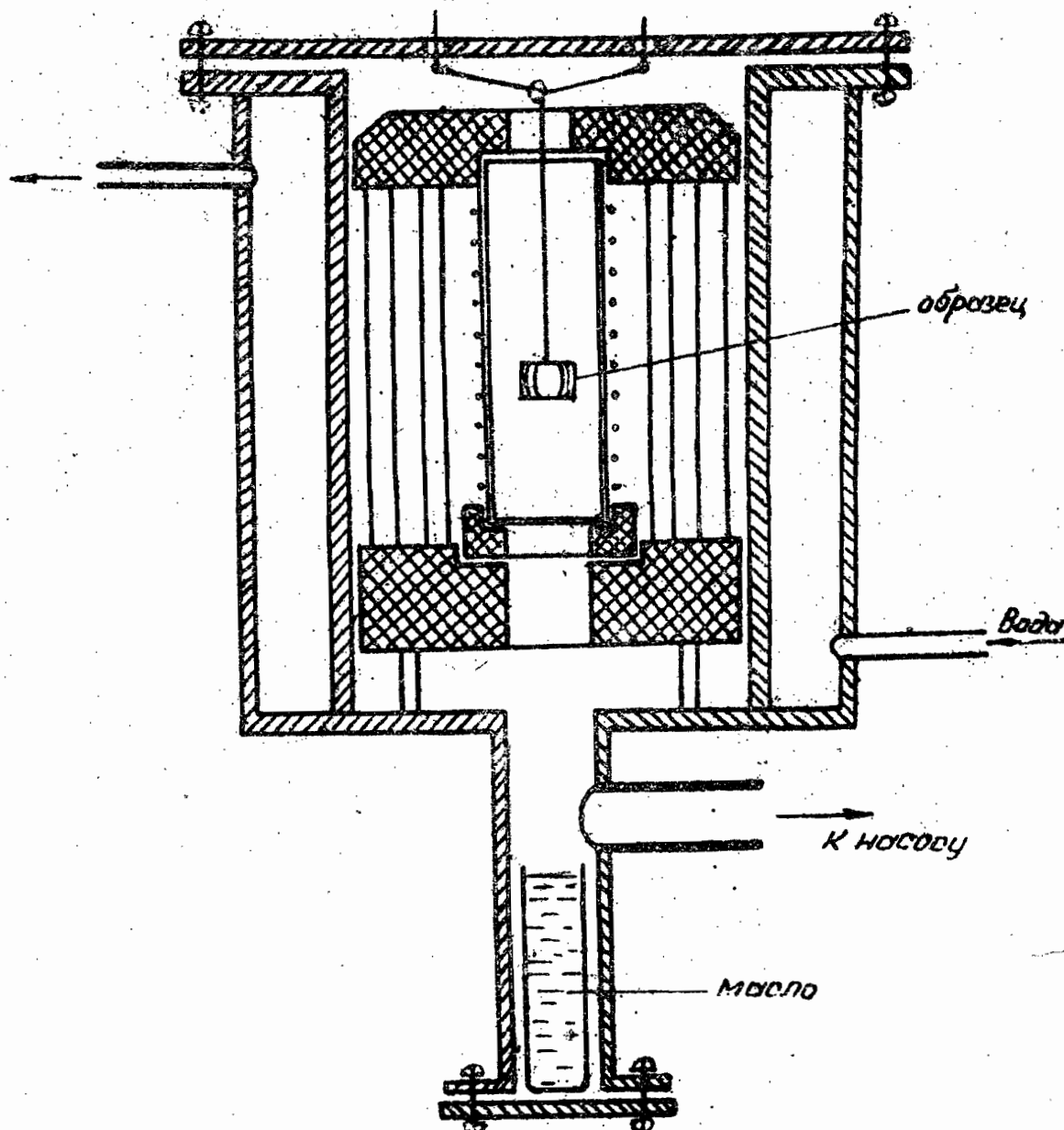
Фиг. 34

Подводимая мощность регулируется стабилизатором напряжения и вармаком, что дает возможность поддерживать температуру $\pm 3^{\circ}\text{C}$ в течение долгого периода времени в пределах от 1000°C до 1900°C , но работает, обычно, с этими установками в интервале от 1100°C до 1700°C .

При надлежащей системе насосов такая конструкция позволяет получать вакуум при нагретой печи порядка $3 \cdot 10^{-5}$ мм ртутного столба.

Контроль температуры осуществляется с помощью оптического пирометра.

На фиг. 35 приведена схема установки для вакуумной закалки с металлическим колпаком и с экранировкой нагревателя.

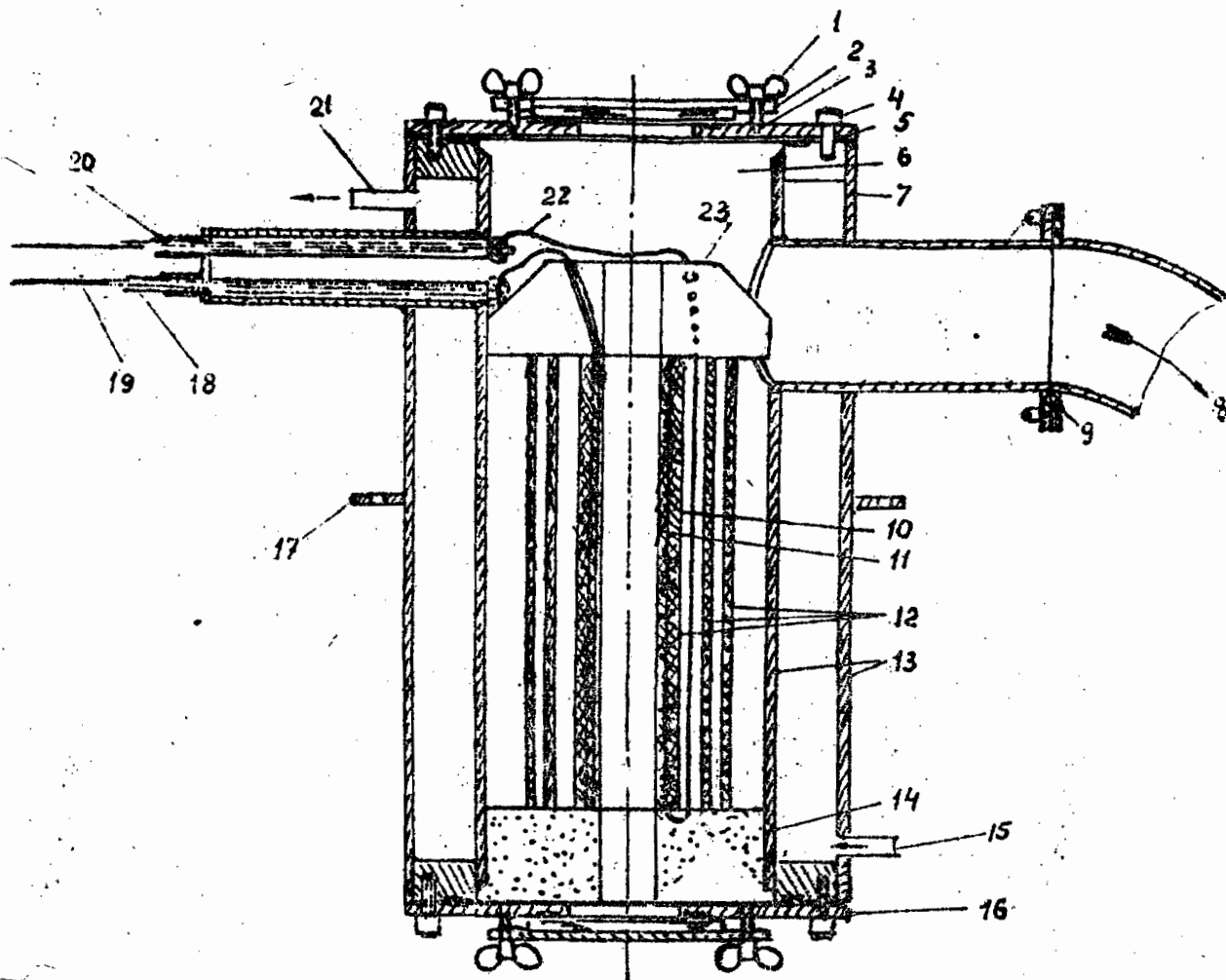


Фиг. 35

Установка состоит из цилиндрического корпуса, охлаждаемого водой, и верхней открывающейся крышки, в которой имеются окно для измерения температуры оптическим пиро-

метром и вводы для подвода тока и устройству, поддержи-
вающему образец.

Образец укрепляется на проволоке, которая расплав-
ляется пропускаемым через нее током после нагрева образ-
ца до температуры закалки и необходимой выдержки.

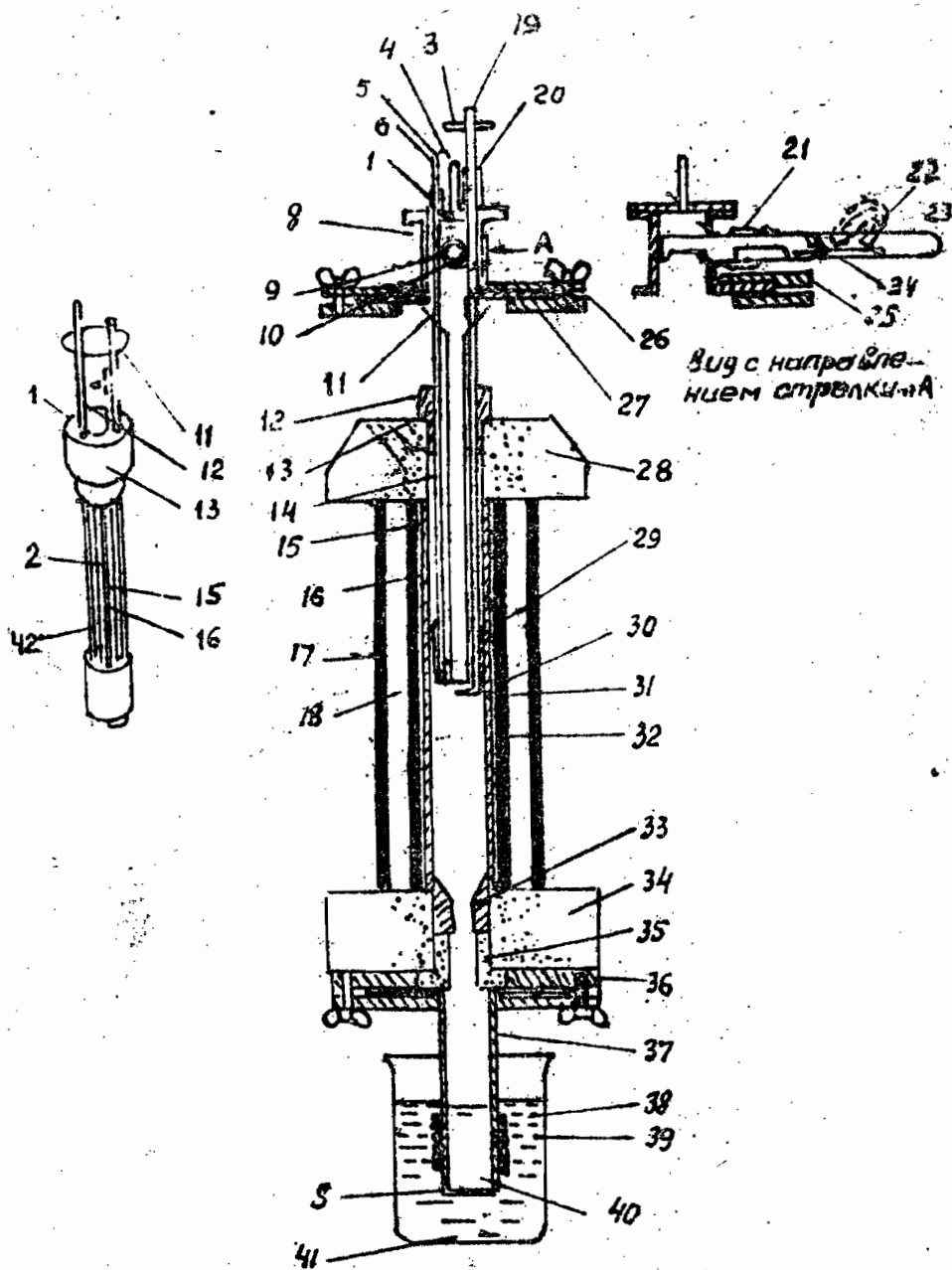


Фиг. 36

Основание установки (плита), на котором помещается
колпак, имеет в центре цилиндрическую шахту, на дне
которой устанавливается стакан с охлаждающей жидкостью,
а сбоку имеется патрубок для присоединения диффузион-
ного насоса и штуцер для вакуумметрической лампы.

Нагреватель из вольфрамовой проволоки намотан на
керамическую трубу, установленную в центре. Для умень-

нения тепловых потерь он защищен системой экранов. Ввод для подведения тока к нагревателю охлаждается водой.



Фиг. 37

Установка рассчитана на получение температуры до 1800°C при вакууме порядка $1 \cdot 10^{-4}$ мм ртутного столба.

На фиг. 36 представлена схема устройства вакуумной печи для закалки, а на фиг. 37 показано внутреннее устройство

стве этой печи для закалки образцов.

Печь состоит из адундовой трубы с молибденовой обмоткой, помещенной в стальной кожухе, охлаждаемом водой, причем вся электрическая и вакуумная арматура подвешена с боковых сторон так, что через крышку и дно обеспечивается доступ ко всем расположенным внутри деталям.

Образцы сплавов, подвергаемые термической обработке, проталкиваются в печь через загрузочную трубу. Подвижной молибденовой лопаткой 30 и лопаткой 42, управляемой снаружи, каждый образец выдерживается в нагревательной камере 32 в течение заданного времени, после чего сбрасывается в охлаждаемую извне ванну с силиконовым маслом 40.

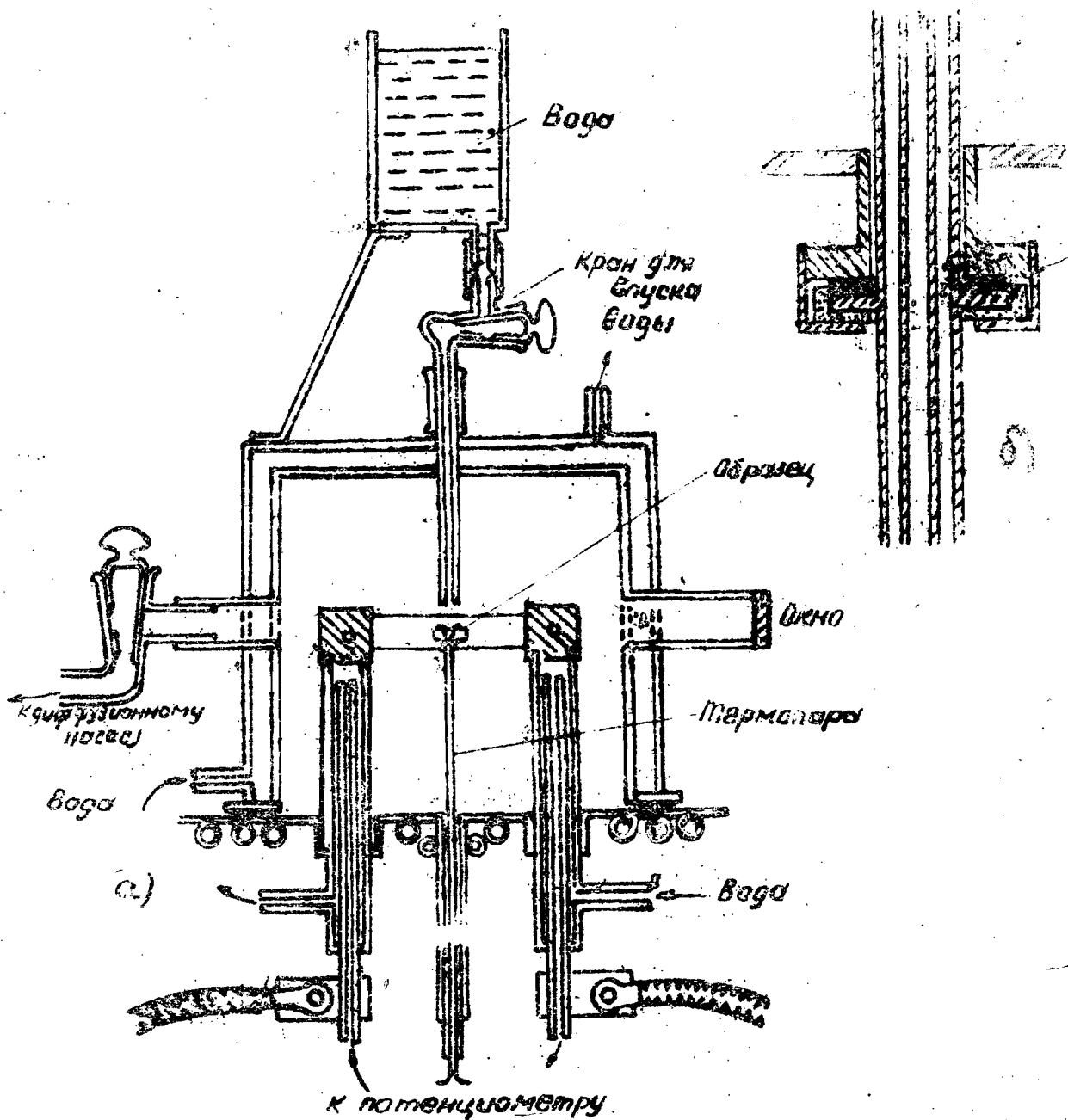
5. Вакуумная закалочная быстроразборная печь

В практике лабораторного эксперимента может возникнуть необходимость в установке, позволяющей быстро проводить закалку нескольких образцов друг за другом. Для этого конструкция установки должна допускать быструю замену образцов. Так как много времени уходит на охлаждение нагретых частей установки, то конструкция, позволяющая производить быстрое охлаждение их, позволила бы значительно сократить время между закалкой двух последующих образцов.

Такая экспериментальная установка представляет собой нагреватель из двух молибденовых полос толщиной 0,2 мм, длиной 10 см и шириной 9-12,5 мм, помещенных между двух охлаждаемых водой медных электродов (фиг. 38).

Образец, объемом обычно около 0,2 см³, подвешивается в зоне нагрева между двумя полосами при помощи обмотанной вокруг него платино-платинородиевой термопары. Электроды монтируются в основании при помощи вакуумных уплотнений, схема которых показана на фиг. 38-б. Аппарат

покрывается охлаждаемым водой латунным колоколом, устанавливаемым на плоскости основания на резиновых прокладках.



Фиг. 33

ках. Металлическая трубка, сообщаящаяся с водным резервуаром при помощи вакуумного крана, проходит через верх колокола и заканчивается непосредственно над образцом. По окончании нагрева и выдержки образец быстро закаливается.

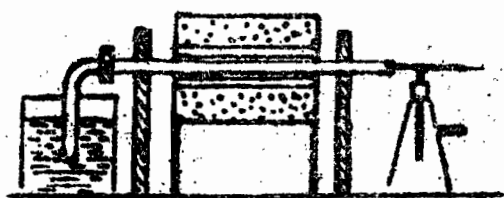
застыть струей из резервуара.

Весь аппарат после этого быстро разбирается, так как вместе с образцом охладилась и нагревные детали установки. Отсутствие огнеупорных частей упрощает удаление воды. Колокол сообщается с масляным диффузионным насосом через вакуумный кран, который служит для отключения насоса при закалке. Ток накала также выключается перед впуском воды.

Наивысшая температура, которой удалось достичь с помощью этого прибора, составляет 1730°C . Однако при замене платино-платинородиевой термопары на вольфрам-молибденовую возможно получение более высоких температур. Конструкцию нагревателя можно изменять, причем вполне возможно применить дуговой нагреватель.

Другой вид печи, позволяющей производить быстрое охлаждение, показан на фиг. 29.

В этом аппарате в печь вставлена длинная кварцевая трубка, которая эвакуируется вакуумным насосом и внутри которой можно быстро впускать воду, заполняющую вакуумное пространство. Установку можно легко изменять так, чтобы нагрев происходил в атмосфере нейтрального газа, а труба эвакуировалась бы перед самой за-



Фиг. 29

калкой. Такого типа аппараты работают удовлетворительно при температуре до 700°C и могут быть использованы при температуре до 1000°C , а в отдельных случаях и до 1200°C .

При конструировании таких приборов очень важно подобрать диаметры трубок и кранов соответствующего размера, чтобы обеспечить достаточный объем воды при та-

ной ее скорости, которая предстарщает образование паровой подушки в трубке.

б. Закалочные среды

Закалочными средами в установках для вакуумной закалки могут служить, как видно отчасти из описания самих установок, вода, ртуть и масло.

Пользоваться водой можно, лишь помещая ее вне камеры и впуская ее только в момент закалки, когда диффузионный насос отключен от самой камеры. В такого рода установках невозможно получить глубокий вакуум и пользоваться ими можно в тех случаях, когда для нагревания образца до нужной температуры достаточно иметь вакуум порядка 10^{-3} - 10^{-4} мм ртутного столба.

Нельзя пользоваться водой как охладителем для металлических порошков.

Ртуть может быть использована в качестве охладителя тоже только для твердых образцов, так как металлические порошки загрязняются ртутью.

Для того чтобы понизить давление паров ртути в системе, на ее поверхность наливает тонкий слой масла.

Пары ртути вредны для здоровья, и поэтому следует избегать пользоваться ртутью.

Наиболее целесообразными охладителями для вакуумной закалки могут служить вакуумные диффузионные масла. Качество масла определяется его устойчивостью к окислению, так как при соприкосновении в горячем состоянии с воздухом масла окисляются и образуются более летучие фракции. Хотя в большинстве закалочных установок раскаленный образец падает в масло при наличии вакуума в камере, все же после нескольких закалок масло немного окисляется и начинает выделять газ, что ухудшает вакуум в камере.

В качестве закалочной жидкости можно использовать, вообще говоря, любое диффузионное масло. Однако по степени устойчивости к окислению не все масла равноценны. Октоил плохо сопротивляется окислению.¹⁾ Лучше ведут себя алифатические масла²⁾, представляющие собой специальные продукты перегонки нефтяных масел.

Еще лучшие свойства обнаруживают жидкости, носящие общее название силиконов и представляющие собой кремнеорганические соединения. Они обладают хорошей термической стабильностью, т.е. не разлагаются при нагревании в соприкосновении с воздухом. Кроме того, они имеют достаточно низкие упругости паров при комнатной температуре.

Во всех конструкциях вакуумных закалочных установок, при размещении резервуара с жидкостью внутри вакуумной камеры, следовало бы предусматривать заслонку, закрывающую резервуар с жидкостью во время разогрева и выдержки образца и открываемую только в момент закалки образца.

1) Октоил - специальный эфир $(C_3H_7CO_2)_2C_6H_5$

2) Алиезон (греч) - без давления

Л и т е р а т у р а

1. А.П. Гуляев, *Металловедение*, 1951.
2. А.А. Бочвар, *Основы термической обработки*, 1940.
3. С.С. Штеинберг, *Термическая обработка стали*, 1945.
4. Г.А. Кащенко, *Основы металлостроения*, 1949.
5. А.Н. Розанов, *Заводская лаборатория*, № 7, 1952.
6. В.Д. Туркин, М.В. Румянцев, *Структура и свойства цветных металлов и сплавов*, 1947.
7. *Энциклопедический справочник машиностроения*, т. 4.
8. А.П. Гуляев, Ю.М. Лахтин, А.И. Тарусин, *Термическая обработка стали*, 1945.
9. В. Ю-Розери, Дж.В. Христиан, В.Б. Пирсон, *Металлургические диаграммы состояния*, Лондон, 1952 (на английском яз.).
10. Хансем М., Камен Э., Кэсслер Г., Макферсон Д., *Journal of metals* 3(10), 881-888 (1951).
11. Хансем М., Кэсслер Г., Макферсон Д., *Transactions ASM* и 44, 518-538 (1952).
12. Тейтель Р. Дж., Коэн М., *Journal of Metals* 3(4), 285-296 (1948).
13. М.К. Макмиллан, *Journal of the Institut of metals*, 79, 379-390, (1951).

- Фиг. 1. Изменение твердости углеродистых сталей при закалке
- Фиг. 2. Оптимальный интервал закалочных температур углеродистой стали
- Фиг. 3. Идеальная кривая закалочного охлаждения.
- Фиг. 4. Закалывающая способность воды в зависимости от температуры ванны при скорости движения образца в ванне 10 см/сек (Розе)
- Фиг. 5. Закалывающая способность воды в зависимости от температур ванны при скорости движения образца в ванне 25 см/сек (Розе)
- Фиг. 6. Закалывающая способность эмульсий воды и масла с различным содержанием масла (Розе)
- Фиг. 7. Влияние температуры ванны на охлаждающую способность 10%-ной эмульсии масла в воде (Розе)
- Фиг. 8. Сравнение закалывающей способности воды и масла (Розе)
- Фиг. 9. Зависимость закалывающей способности масла от его температуры
- Фиг. 10. Схема последовательных моментов искривления бруска стали при закалке с односторонним остыванием (охлаждение снизу): а - исходное состояние бруска; б - первый момент: термическое сжатие нижнего слоя; в - второй момент: то же, мартенситное превращение нижнего слоя; г - третий момент: мартенситное превращение верхнего слоя
- Фиг. 11. Пресс для закалки зубчатых колес
- Фиг. 12. Глубина закалки в зависимости от критической скорости охлаждения

- Фиг. 13. Кривые охлаждения центра, поверхности и сечения, расположенного на $1/2 z$, наложенные на С-диаграмму
- Фиг. 14. Твердость полумартенситной зоны в зависимости от содержания углерода
- Фиг. 15. Распределение твердости в серии цилиндрических образцов автотоктоидной стали, закаленных в воде
- Фиг. 16. а - схема устройства для торцевого метода прокаливаемости; б - форма образца
- Фиг. 17. Полосы прокаливаемости некоторых марок сталей.
- Фиг. 18. Диаграмма состояния медь-алюминий
- Фиг. 19. Изменение твердости алюминиевых бронз при закалке и отпуске (Мацуда)
- Фиг. 20. Изотермы насыщения в области α медного угла системы $Cu-Si-Mn$.
- Фиг. 21. Диаграмма состояния сплавов $Cu-Ni-Si$ (Корвон)
- Фиг. 22. Диаграмма состояния $Cu-Be$ (Вассерман и Танимура)
- Фиг. 23. Изменение твердости бериллиевых бронз при отпуске
- Фиг. 24. Диаграмма состояния $Al-Mg$ (Дико)
- Фиг. 25. Диаграмма состояния $Al-Cu$
- Фиг. 26. Типичная кривая изменения прочности при естественном старении алюминиевого сплава
- Фиг. 27. Влияние меди и магния на механические свойства дуралюмина (в термически обработанном состоянии) (по С.М. Воронову)
- Фиг. 28. Механические свойства дуралюмина в закаленном и состаренном состоянии в зависимости от температуры закалки
- Фиг. 29. Последовательные этапы закалки образцов в вакуумные ампулы

- Фиг. 30. а - правильно запаянная ампула;
б - неправильно запаянная ампула;
в - способ обвязки стеклянной ампулы хромелевой проволокой.

Фиг. 31. Схема лабораторного кварцевого прибора для вакуумной закалки

Фиг. 32. Общий вид лабораторного кварцевого прибора

Фиг. 33. Высокотемпературная печь для вакуумной закалки с индукционным нагревом

- 1 - смотровое окошко из стекла пирекс,
- 2 - механизм для защиты смотрового стекла,
- 3 - латунная головка с разрывной винтовой нарезкой,
- 4 - змеевик охлаждения,
- 5 - вакуумный отвод,
- 6 - державка образца,
- 7 - прокладка из неопрена,
- 8 - латунная крышка печи,
- 9 - трубка из окиси циркония,
- 10 - трубка из огнеупорного материала "вайкор",
- 11 - трубка водяного охлаждения из "люстита",
- 12 - четыре латунные стяжки,
- 13 - отвод охлаждающей воды,
- 14 - изоляция из порошка окиси циркония,
- 15 - проволока для подвешивания образца,
- 16 - образец,
- 17 - нагревательная камера (вольфрам или тантал),
- 18 - трубка и крышка из окиси циркония,
- 19 - индукционная обмотка,
- 20 - три молибденовые подставки для камеры,
- 21 - трубки из окиси циркония,
- 22 - подставка из огнеупорного кирпича,
- 23 - ввод воды для охлаждения,
- 24 - парафиновый ватвор,
- 25 - змеевик охлаждения,

- 26 - опорная латунная плита печи,
- 27 - кран для впуска воздуха,
- 28 - четыре опорные стойки печи,
- 29 - стол с отверстием,
- 30 - сосуд для закатки,
- 31 - захимное устройство с крюками для поддона,
- 32 - латунный поддон.

Фиг. 34. Установка для вакуумной закатки с обмоткой сопротивления:

- 1 - захим,
- 2 - электрические вводы,
- 3 - резиновое уплотнение,
- 4 - изоляционный кирпич,
- 5 - стягивающие стержни,
- 6 - кольца из окиси бериллия,
- 7 - вольфрамовый диск,
- 8 - труба из окиси бериллия,
- 9 - уплотнение на вакуумной замазке,
- 10 - основание,
- 11 - вакуумная линия,
- 12 - смотровое окно из стекла "пирекс",
- 13 - трубка водяного охлаждения,
- 14 - вольфрамовый стерженец,
- 15 - кварцевая труба,
- 16 - 52 витка молибденовой проволоки диам. 0,025 дюйма с расстоянием $1/3$ дюйма между витками,
- 17 - образец,
- 18 - гранулированная окись бериллия

Фиг. 35. Установка для вакуумной закатки с экранировкой нагревателя

Фиг. 36. Разновидность вакуумной печи для закатки:

- 1 - основание из специальной керамики,
- 2 - фланцевая пластинка,
- 3 - смотровое окно из стекла "пирекс",

- 4 - болт,
- 5 - верхняя крышка печи,
- 6 - резиновая прокладка,
- 7 - уплотнение водяной рубашки,
- 8 - вакуумная линия,
- 9 - резиновая подкладка,
- 10 - внутренняя алундовая труба,
- 11 - молибденовая спираль с алундовой замазкой,
- 12 - алундовые экраны,
- 13 - железные кожухи водяной рубашки,
- 14 - основание из специальной керамики,
- 15 - ввод воды,
- 16 - нижняя крышка печи,
- 17 - фланец,
- 18 - изолятор из стекла "пирекс",
- 19 - латунные электроды,
- 20 - уплотнение вакуумной замазкой,
- 21 - выход воды,
- 22 - подводка к нагревателю печи,
- 23 - крышка нагревательной камеры из специальной керамики.

Фиг. 37. Внутреннее устройство вакуумной печи для закалки:

- 1 - молибденовый блок,
- 2 - опорные стержни молибденового блока,
- 3 - рукоятка лопатки,
- 4 - смотровая труба,
- 5 - концы холодного спая термопары,
- 6 - вакуумная замазка,
- 7 - резиновая трубка,
- 8 - уплотнения, спаянные серебром,
- 9 - стекло,
- 10 - образец,
- 11 - молибденовая воронка,
- 12 - кварцевая трубка,
- 13 - верхняя пробка,
- 14 - термопара,

- 15 - алундовая трубка,
- 16 - алундовая направляющая для образца,
- 17 - железный блок,
- 18 - чехол термпары,
- 19 - стойка для лопатки,
- 20 - подшипник для стойки лопатки,
- 21 - резиновая трубка,
- 22 - магнит,
- 23 - трубка из стекла "пирекс",
- 24 - толкатель для образцов,
- 25 - образец в железной оболочке,
- 26 - прижимная плита,
- 27 - латунная плита,
- 28 - керамиковая крышка,
- 29 - трубка из окиси бериллия,
- 30 - молибденовая лопатка,
- 31 - алундовый наконечник,
- 32 - рабочая камера печи,
- 33 - воронка,
- 34 - основание из керамики,
- 35 - изолятор из специальной керамики,
- 36 - латунная плита печи,
- 37 - резервуар для закали,
- 38 - змеевик холодильника,
- 39 - водяная ванна,
- 40 - силиконовое масло,
- 41 - стакан,
- 42 - лопатка.

Фиг. 38. а - схема закалочной быстроразборной печи;
 б - схема вакуумного уплотнения.

Фиг. 39. Вакуумная печь для закали в воде.