

А. В. Петрам

ЗАКЛЮЧЕННЫЕ
СРЕДЫ

Л. В. ПЕТРАШ

621.785

17-30



ЗАКАЛОЧНЫЕ СРЕДЫ

217883



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МОСКВА 1959 ЛЕНИНГРАД

В книге подробно рассматриваются различные закалочные среды, описываются особенности процессов охлаждения в них, приводятся данные об охлаждающей способности наиболее часто применяемых закалочных сред на водной и масляной основах, а также расплавленных металлов, солей и щелочей.

Книга предназначена для инженерно-технических работников и может быть использована студентами вузов.

Рецензент канд. техн. наук *Н. Ф. Вязников*

Редактор канд. техн. наук *М. М. Замятин*

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА
Редакция литературы по технологии машиностроения
Заведующий редакцией инж. *Е. П. Наумов*

ВВЕДЕНИЕ

При термической обработке стали правильный выбор закалочных сред оказывает решающее влияние на качество изделий.

В настоящее время закалка наиболее часто производится в воде, водных растворах солей и щелочей, а также в маслах.

Вода и среды на водной основе отличаются высокой охлаждающей способностью, но им свойственно слишком быстрое охлаждение поверхности изделий в области низких температур и резкая зависимость охлаждающей способности от температуры.

В результате этого при закалке в воде на изделиях нередко получают трещины.

Масла лишены этих пороков, но обладают пониженной охлаждающей способностью.

Другие, реже применяемые закалочные среды — расплавы солей, щелочей и металлов близки по охлаждающей способности к маслам.

Изучению закалочных сред посвящено много работ. В этих работах производилось сравнение резкости охлаждения в различных средах, исследовалось влияние температуры, циркуляции и различных добавок на скорость охлаждения и результаты закалки. Однако характеристики охлаждающей способности многих закалочных сред и процесс охлаждения в них все еще изучены недостаточно.

Целью предлагаемой книги является систематизация теоретических и практических данных по закалочным средам, определение границ возможного их применения и выяснение механизма некоторых явлений, наблюдаемых в процессе охлаждения.

Приведенные в книге материалы помогут более обоснованно выбирать и использовать закалочные среды при термической обработке изделий. Они же могут быть использованы при разработке новых закалочных сред.

ГЛАВА I

ОСОБЕННОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

Охлаждение при закалке стали должно обеспечивать получение определенных структур по сечению изделий, т. е. определенную их прокаливаемость, и вместе с тем не должно вызывать закалочных дефектов — трещин, коробления, деформации и повышенного уровня остаточных напряжений.

При закалке стали на мартенсит охлаждение ее в интервалах пониженной устойчивости аустенита ниже критической точки A_1 должно производиться со скоростью, превышающей критическую скорость закалки, значения которой для легированных сталей колеблются от десятых долей до 100 град/сек., а для углеродистых — от 100 до 600 град/сек. Несмотря на то, что в соответствии с данными термокинетических и С-кривых ускоренное охлаждение необходимо только в сравнительно узких интервалах температур, соответствующих перлитному и бейнитному превращениям, фактически, в силу значительности объема и тепловой инерции закаливаемых изделий, ускоренное охлаждение их обычно распространяется на значительно больший интервал температур. При закалке изделий на мартенсит применяется форсированное охлаждение поверхности, скорость снижения температуры которой часто значительно превышает критическую скорость закалки стали.

С точки зрения образования закалочных дефектов скорость охлаждения выше мартенситной точки M_n играет различную роль. При повышении скорости резко увеличивается коробление и повышается уровень тепловых напряжений. Однако получаемое при этом повышение тепловых напряжений часто приводит к снижению суммарных закалочных напряжений, что уменьшает вероятность образования закалочных трещин.

Ускоренное охлаждение в мартенситном интервале крайне нежелательно, так как вызывает резкое увеличение напряжений. Особенно опасными оказываются растягивающие напряжения, которые в условиях временного снижения прочности стали в период превращения и неблагоприятного физико-химического воздействия горячей воды [13] могут вызывать образование трещин.

Таким образом, требования к режиму охлаждения с точки зрения обеспечения необходимых закалочных структур и предотвра-

щения закалочных дефектов часто противоречивы и должны быть согласованы.

В большинстве случаев наиболее удовлетворительным является умеренное охлаждение при высоких температурах, ускоренное между точками A_1 и Mn , и медленное — в интервале мартенситного превращения. Многообразие форм и размеров обрабатываемых изделий, а также огромное различие в значениях критических скоростей закалки стали указывают на потребность в закалочных средах с охлаждающей способностью, плавно изменяющейся в возможно более широких пределах.

В зависимости от свойств стали, характера требуемых структур, а также формы и размеров изделий, для их охлаждения при закалке применяются среды, значительно отличающиеся по своим физическим свойствам: воздух, металлические плиты, расплавленные металлы, соли и щелочи, вода, водные растворы различных веществ, масла и пр.

Отличие между перечисленными средами не исчерпывается только тем, что они охлаждают изделия быстрее или медленнее. Очень важной характеристикой сред, применяемых для закалки, является то, что некоторые из них быстро отбирают тепло в самом начале процесса охлаждения, другие — в середине, третьи — в конце. Наибольшее влияние на характер охлаждения закалочных сред оказывает наличие или отсутствие изменения их агрегатного состояния в период охлаждения.

Расплавленные соли и металлы, применяемые при закалке, обычно имеют температуры кипения, значительно превышающие температуры охлаждаемых изделий. Эти среды в процессе охлаждения не кипят, не изменяют своего агрегатного состояния, поэтому кривые охлаждения их не имеют резких перегибов, свидетельствующих о значительных ускорениях или замедлениях процесса охлаждения. Такие среды, как вода, водные растворы различных веществ, масла и др. кипят при температуре значительно более низкой, чем температура охлаждаемых в них изделий. Вследствие этого при соприкосновении с раскаленными изделиями эти жидкости кипят, изменяя свое агрегатное состояние.

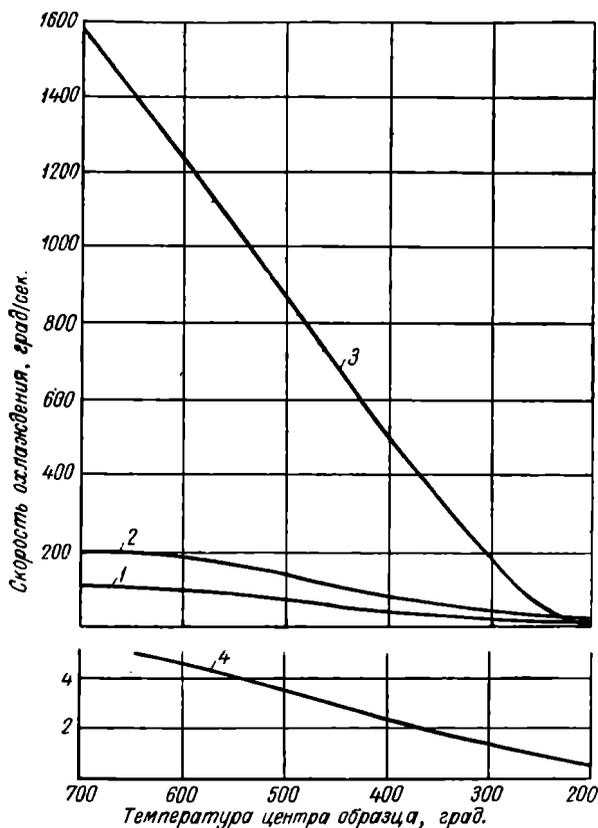
В связи с тем, что процессы охлаждения в средах обеих групп происходят по-разному, рассмотрение их будет произведено раздельно.

1. ОХЛАЖДЕНИЕ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ

Охлаждение без изменения агрегатного состояния характерно для таких сред, как воздух, твердые металлы, расплавленные металлы, соли и др.

Кривая зависимости скорости охлаждения серебряного 20-миллиметрового образца в спокойном воздухе от температуры его центра дана на фиг. 1. В период всего охлаждения теплообмен осуществляется излучением, конвекцией и теплопроводностью.

Теплоотвод излучением при высоких температурах является главным способом отбора тепла; при низких температурах существенное значение приобретают конвекция и теплопроводность. Коэффициент теплоотдачи между 750 и 100° плавно снижается с 63 до



Фиг. Скорости охлаждения сферических образцов:

1 — нихромового образца размером 4 мм в железных плитах; 2 — то же в медных плитах; 3 — то же в расплаве (70% Cd и 30% Sn) при 180°; 4 — серебряного образца размером 20 мм в спокойном воздухе. Скорости охлаждения образцов 1, 2, 3 приводятся по [31].

18 ккал/м² час град. Скорость охлаждения при этом может быть в несколько раз увеличена за счет циркуляции воздуха и особенно за счет применения струи сжатого воздуха. Если скорость воздушной струи в процессе охлаждения будет оставаться постоянной, то кривая зависимости скорости охлаждения от температуры образца расположится выше, но характер ее при этом не изменится.

Кривые охлаждения 4-миллиметрового нихромового шарика в железных и медных плитах приведены на фиг. 1. Здесь главным

способом теплоотвода в период всего охлаждения является теплопроводность. Как и в предыдущем случае, скорость теплоотвода во всем интервале охлаждения снижается плавно, без всяких аномалий. Несмотря на то, что коэффициент теплопроводности медных плит почти в 10 раз больше, чем у железных, скорость охлаждения в них только в 2 раза больше, чем в железных. Это несоответствие объясняется повышенным тепловым сопротивлением воздушного зазора между охлаждаемым образцом и плитами, а также пониженной теплопроводностью окисных пленок на соприкасающихся поверхностях. Повышение скорости охлаждения изделий в плитах может быть достигнуто применением повышенного давления на плиты, увеличением массы плит, а также применением их внутреннего водяного охлаждения.

Как видно из фиг. 1, аналогичный характер имеет и охлаждение в расплавленных металлах с высокой температурой кипения. Скорость охлаждения в них, несмотря на более низкое значение теплопроводности, благодаря лучшему контакту, а также теплоотводу конвекцией, почти в 10 раз больше, чем в твердых металлах. Более низкая скорость охлаждения при низких температурах в них обусловлена снижением температурного перепада.

Как будет показано ниже, такой же характер охлаждения наблюдается и в расплавленных солях и щелочах.

Таким образом, твердые и жидкие металлы, расплавленные соли и щелочи, а также другие среды, не изменяющие в процессе закалки своего агрегатного состояния, несмотря на различные способы теплообмена в них, по характеру охлаждения сходны между собой.

Процесс охлаждения изображается плавно снижающейся кривой и может быть с достаточной для практики точностью рассчитан по формуле Ньютона:

$$Q = \alpha F (t_f - t_w),$$

где $t_f - t_w$ — разница температур охлаждаемой поверхности и среды в градусах;

F — площадь поверхности в m^2 ;

α — коэффициент теплоотдачи в $ккал/m^2 \text{ час град}$.

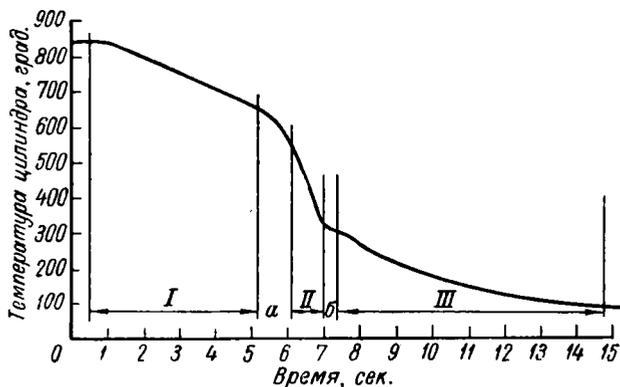
Коэффициент теплоотдачи для этих сред при теплотехнических расчетах может выбираться усредненным для всего температурного интервала охлаждения.

2. ОХЛАЖДЕНИЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ

Принципиально иной характер охлаждения имеет место в таких средах, как вода, водные растворы солей, щелочей и кислот, температуры кипения которых ниже температуры охлаждаемых в них изделий, и которые, следовательно, кипят.

Охлаждение изделий в этих средах носит неравномерный характер, с резко выраженными максимумами скорости охлаждения в начальном, среднем или конечном периодах охлаждения. Ввиду сложности самого процесса охлаждения в этих средах усреднение коэффициента теплоотдачи для всего периода охлаждения и использование расчетной формулы Ньютона связано со значительными погрешностями. Поэтому усреднение коэффициента теплоотдачи производится в этом случае не для всего процесса охлаждения, а только для отдельных периодов, характеризующихся более однородными условиями теплоотвода.

В 1919 г. Пиллингем и Линчем [41] на основании кривых охлаждения центра образца процесс охлаждения в таких средах.



Фиг. 2. Три стадии охлаждения цилиндрического образца $\varnothing 6,4$ мм, $l = 50$ мм (95% Ni + 5% Si) в воде при 58°

был подразделен на три стадии (фиг. 2): I — стадия охлаждения в паровой пленке; II — стадия охлаждения при интенсивном кипении; III — стадия охлаждения конвекцией. Между этими стадиями в промежутках *a* и *б* наблюдаются переходные состояния.

Скорость теплоотвода в различных стадиях охлаждения неодинакова. В стадии I вследствие наличия на поверхности изделия паровой пленки охлаждение происходит со сравнительно низкой скоростью. Наиболее быстрое охлаждение характерно для стадии II, в которой жидкость соприкасается с поверхностью изделия и интенсивно кипит. Стадия III охлаждения также характеризуется более умеренными скоростями охлаждения.

Подробно процесс охлаждения с изменением агрегатного состояния изучался С. С. Кутателадзе [11], В. М. Боришанским [6], П. А. Ребиндером и Н. А. Плетеновой [19], Е. А. Казаковой [6], Мак-Адамсом [38] и др. В результате этих исследований был уточнен механизм теплоотвода в различные периоды охлаждения и создана математическая теория теплопередачи при изменении агрегатного состояния вещества.

В соответствии с современной терминологией стадии охлаждения в средах (см. фиг. 2), изменяющих свое агрегатное состояние, получили следующие названия:

- I* — стадия пленочного кипения;
- II* — стадия пузырьчатого кипения;
- III* — стадия конвективного теплообмена.

Изучение отдельных стадий охлаждения должно производиться на основании исследования процесса охлаждения поверхности изделий. К сожалению, удовлетворительной методики точного измерения, а также записи температур поверхности изделий в процессе их охлаждения и низкокипящих жидкостях еще не разработано. Многие исследователи, в том числе Френч [32], а также автор измеряли температуры охлаждаемых поверхностей металлических образцов с помощью изолированных тонких электродов термопар, порознь приваренных к поверхности изделий. Однако результаты этих записей неизбежно были связаны с весьма существенными искажениями температурного поля приваренными электродами, которые к тому же всегда могли очень быстро охлаждаться жидкостью, даже если сама поверхность образца при этом охлаждалась более медленно. Вследствие заведомо недостаточной точности таких кривых, анализ процесса охлаждения на их основе представляется недостаточно обоснованным. Поэтому такой анализ приходится производить на основе косвенных методов исследования процессов в отдельных стадиях охлаждения, а также записей кривых охлаждения объемов металла, близко прилегающих к поверхности. Чаще всего такой анализ осуществляется на основе кривых охлаждения центров маленьких образцов, изготовленных из металлов, имеющих повышенную теплопроводность. Хотя последний метод не может дать исчерпывающего представления о процессах на самой поверхности, он отображает его с наибольшей возможной в настоящее время степенью приближения.

Стадия пленочного кипения

Если низкокипящую жидкость разлить на очень горячей металлической поверхности, то она совершенно не смачивает поверхность и принимает форму шаров-сфер, быстро перемещающихся по поверхности, как шарики ртути на стекле.

На это явление, известное под названием сфероидального состояния жидкости, еще в 1746 г. обратил внимание Л. Эйлер [30], а в 1756 г. оно описано Лейденфростом [36].

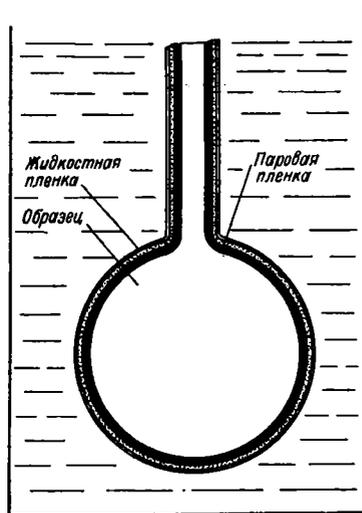
Сфероидальное состояние при закалке изделий обуславливает пленочное кипение большого объема жидкости находящегося в контакте с раскаленной металлической поверхностью. Непосредственно после соприкосновения изделия с жидкостью, часть ее превращается в пар, который тут же конденсируется более холодной жидкостью. Так как жидкость быстро нагревается, то в дальнейшем конденсация замедляется, новые порции непрерывно образую-

щегося пара не успевают конденсироваться и образуют паровую пленку, окруженную пленкой нагретой жидкости. Как пар, так и жидкость в пленке находятся в непрерывном движении. Эта парожидкостная пленка отделяет раскаленную поверхность от всей массы жидкости (фиг. 3). На внутренней поверхности жидкостная пленка перегрета выше температуры кипения, и жидкость интенсивно испаряется. На поверхности, соприкасающейся с массой жидкости, температура не достигает точки кипения и здесь происходит конденсация пара.

Еще в 1920 г. Мосщицкий и Бродер [39] установили, что смена одного режима кипения другим наступает при вполне определенных для каждой жидкости критических значениях перегрева охлаждаемой поверхности выше температуры кипения жидкости. Критический перегрев различных жидкостей — этилового эфира, этилового уксуса, воды, ксилола и др., — температура кипения которых находилась в пределах 34,5—139°, получили равным 20—49°.

В частности, при охлаждении тонкой платиновой проволоки в воде пленочное кипение было устойчиво начиная с высоких температур до 131° на охлаждаемой поверхности, т. е. критический перегрев в этом случае составлял 31°. Этими же исследователями установлено, что величина критического перегрева охлаждаемой поверхности по сравнению с температурой кипения жидкости зависит и от материала охлаждаемого образца, хотя, как видно из полученных ими данных, зависимость эта довольно слабая. Например, получены следующие значения критических перегревов при охлаждении в воде:

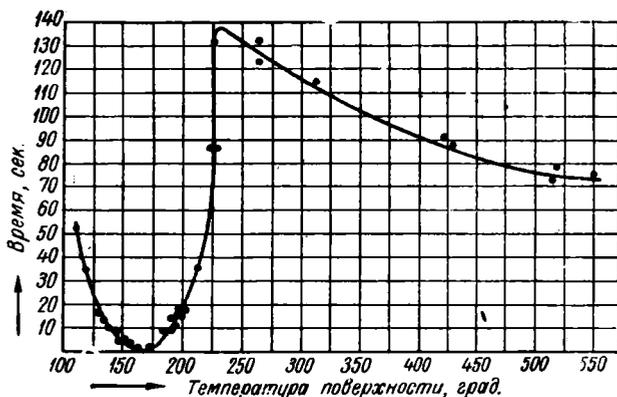
| | |
|-------------|-------|
| для платины | 31° |
| железа | 33° |
| серебра | 39° |
| никеля | 45° |
| меди | 47,5° |
| свинца | 57° |



Фиг. 3. Схема образования паровой пленки на раскаленном образце, охлаждаемом в воде.

В. М. Боришанским [6] изучена зависимость времени испарения капель воды от температуры металлической поверхности, представленная кривой на фиг. 4. После сравнительно продолжительного испарения при высоких температурах, указывающего на наличие

сфероидального состояния жидкости, наиболее медленное испарение получено при температуре поверхности 230° . Эта температура является наименьшей, при которой еще устойчиво сфероидальное кипение. В интервале $230-160^{\circ}$ наблюдается резкое сокращение времени испарения капель, характеризующее переход от сфероидального к пузырьчатому кипению. При дальнейшем снижении температуры поверхности продолжительность испарения капель вследствие снижения температурного напора снова несколько возрастает. Таким образом можно заключить, что смена режима кипе-



Фиг. 4. Зависимость полного времени испарения капель воды на поверхности латуни от температуры поверхности.

ния воды на металлической поверхности происходит в интервале $230-160^{\circ}$.

В. М. Боришанским, кроме того, определена зависимость значений указанных температур поверхности от температуры воды, из которой видно, что подогрев воды приводит к снижению критических температур медной поверхности от $250-150^{\circ}$ для холодной до $230-140^{\circ}$ для горячей воды. Из этих же данных следует, что интервал температур перехода от пленочного к пузырьчатому кипению имеет неодинаковую ширину для латунной и медной поверхностей. Значения критических температур зависят (хотя и не очень сильно) от рода металла охлаждаемой поверхности. Н. А. Плетьева и П. А. Ребиндер [19] исследовали эти же явления в совершенно других условиях и определили температуру поверхности, соответствующую переходу от пленочного кипения к пузырьчатому, равной 250° , что хорошо согласуется с данными В. М. Боришанского. Зависимость характера режима кипения жидкостей от температуры горячей поверхности обычно соответствует зависимости скорости теплоотвода с поверхности и величины коэффициента теплоотдачи от этой же температуры.

Из приведенных данных видно, что основной причиной изменения режима кипения жидкости, находящейся в контакте с данной

металлической поверхностью, является температура нагрева этой поверхности.

При высоких температурах охлаждаемой поверхности устойчивым является пленочное кипение. При достижении некоторых, вполне определенных для каждой жидкости критических температур поверхности, пленочное кипение становится неустойчивым и сменяется пузырьчатым.

Теплоотдача при пленочном кипении затруднена и ее интенсивность зависит от толщины пароводяной пленки. Давление пара внутри последней P_n равно сумме атмосферного давления P_a давления столба жидкости $P_{ж}$ и давления, создаваемого поверхностным натяжением водяной пленки $P_{п.н}$, т. е.

$$P_n = P_a + P_{ж} + P_{п.н}.$$

Повышенное давление внутри пленки обуславливает перегрев пара в ней выше температуры кипения жидкости. Повышение внешнего давления снижает толщину пароводяной пленки и ускоряет теплоотвод. Нижние части изделий при охлаждении в жидкости испытывают большее давление, что способствует более быстрому охлаждению их в стадии пленочного кипения по сравнению с верхними частями изделий. Это более четко выясняется при закалке длинных изделий в глубоких баках, а также при закалке в условиях повышенного давления.

Следует отметить, что повышение давления не является единственной причиной более интенсивного охлаждения нижней части изделий. Нижние части омываются обычно более холодной жидкостью, а верхние — жидкостью, уже нагретой от нижних слоев. То же самое имеет место при взаимном перемещении охлаждаемого изделия и жидкости, при котором происходит смятие пароводяной пленки. Толщина пленки при прочих равных условиях определяется относительной величиной скоростей образования и конденсации пара. Повышение скорости образования, при одновременном снижении скорости конденсации пара, имеющее место, например, при соприкосновении сильно раскаленной металлической поверхности с горячей водой увеличивает как толщину пленки, так и ее устойчивость. При этом уменьшается скорость теплоотвода. При охлаждении изделия в холодной жидкости толщина пленки, а также ее устойчивость снижаются, она периодически разрушается, снова появляется и, наконец, полностью становится неустойчивой и исчезает. При этом жидкость вступает в прямой контакт с нагретой поверхностью, и начинается пузырьчатое кипение.

Стадия пузырьчатого (ядерного) кипения

Пузырчатое кипение наступает при условии полного разрушения паровой пленки, которое наблюдается при охлаждении поверхности до критической температуры. При этом режиме кипения, характеризующемся наиболее быстрым отводом тепла, жидкость смачивает металлическую поверхность и непосредственно с ней соприкасается. В процессе кипения возникают многочислен-

ные пузырьки пара, на образование которых затрачивается тепло испарения. Отрываясь, пузырьки уносят значительное количество тепла, а на их место поступают новые объемы воды, омывающие поверхность. Скорость отвода тепла при этом режиме кипения наиболее сильно зависит от величины теплоты испарения охлаждающей жидкости, а также от количества возникающих пузырьков пара, величины их «отрывных» размеров, скорости подъема и характера теплообмена с жидкостью. На скорость образования и удаления пузырьков влияют величина поверхностного натяжения и удельный вес жидкости, удельный вес пара, величина внешнего давления, а также температура и свойства охлаждаемой поверхности.

В условиях закаливания, когда нагретые изделия охлаждаются в больших объемах холодной жидкости, образуется множество мелких легко отрывающихся пузырьков пара, которые всплывают, и, образуя вместе с восходящими потоками жидкости эмульсию, конденсируются и отдают ей свое тепло. Лишь немногие из пузырьков всплывают вместе с жидкостью и достигают ее поверхности.

Происходящее при заливке изделий интенсивное перемешивание охлаждающей жидкости способствует омыванию ею нагретой поверхности изделий, вследствие чего отвод тепла осуществляется не только паром, но и частицами перегретой жидкости, непосредственно соприкасающейся с поверхностью. Скорость охлаждения при этом достигает максимальных значений, и температура поверхности изделий очень быстро снижается. При понижении температуры до точки кипения, последнее прекращается, и наступает стадия конвективного теплообмена, характеризующаяся более умеренным охлаждением.

Стадия конвективного теплообмена

Основным условием такого теплообмена является падение температуры охлаждаемой поверхности ниже температуры кипения жидкости. Скорость теплоотвода в этой стадии сравнительно низка и определяется в основном уровнем значений теплоемкости, вязкости и теплопроводности жидкости, а также величиной температурного перепада между поверхностью и жидкостью. Большое влияние на скорость теплоотвода при этом оказывает скорость циркуляции жидкости.

Непосредственное наблюдение охлаждения в жидкостях небольшой вязкости подтверждает наличие многочисленных турбулентных потоков, направленных от охлаждаемой поверхности в глубь жидкости. Вместо удаляющихся горячих объемов жидкости в соприкосновении с поверхностью вступают объемы более холодной жидкости. При более высоких значениях вязкости горячая жидкость, находящаяся у поверхности, образует турбулентный слой, внутри которого жидкость поднимается вверх. При еще более высокой вязкости около охлаждаемой поверхности образуется тонкий трубчатой формы ламинарный поток, который под-

нимается вверх, и горячая жидкость, поднимающаяся внутри него, разливается по поверхности. Теплоотвод в последнем случае происходит с наименьшей скоростью.

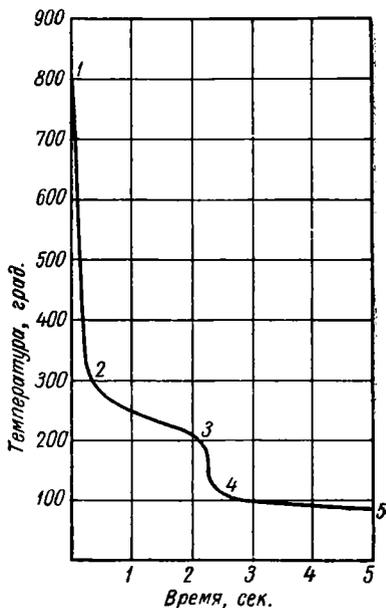
3. ОСОБЕННОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ И СЕРДЦЕВИНЫ ИЗДЕЛИЙ В НИЗКОКИПАЩИХ СРЕДАХ

Как уже было указано, точных способов записи температурных кривых охлаждения поверхности изделий не имеется. Поэтому исследование охлаждения поверхности может производиться на основе, например, кривых охлаждения объемов металла, расположенных в непосредственной близости от поверхности. Однако некоторые полезные данные могут быть взяты также из кривых охлаждения самой поверхности, полученных упомянутыми ранее приближенными способами¹. Такая кривая для воды, полученная с помощью тонких изолированных, приваренных порознь электродов тонкой термопары, показана на фиг. 5. На участке 1—2 кривой за очень короткое время, исчисляемое долями секунд, происходит быстрое охлаждение за счет отбора тепла, затрачиваемого на образование паровой пленки. Величина первичного падения, как показывают опыты, зависит от свойств жидкости и, в частности, от значения тепла парообразования, температуры и вязкости, а также от характеристики охлаждаемого изделия: температуры, величины удельной поверхности, формы, а также тепловых характеристик металла.

Величина первичного падения температур металлического образца в различных средах дана в табл. 1.

Участок 2—3 соответствует стадии пленочного кипения. Здесь паровая пленка имеет максимальную толщину и характеризуется высокой устойчивостью. Участок кривой 3—4 соответствует стадии пузырьчатого кипения, участок 4—5 — стадии конвективного теплообмена.

¹ Описанные ниже данные в связи с недостатками методики измерения температуры поверхности могут рассматриваться только с качественной стороны. Продолжительность охлаждения поверхности в действительности больше, чем это следует из фиг. 5, а установленные границы первичного падения температуры за счет образования паровой пленки, по нашему мнению, чрезмерно низки (*прим. ред.*).

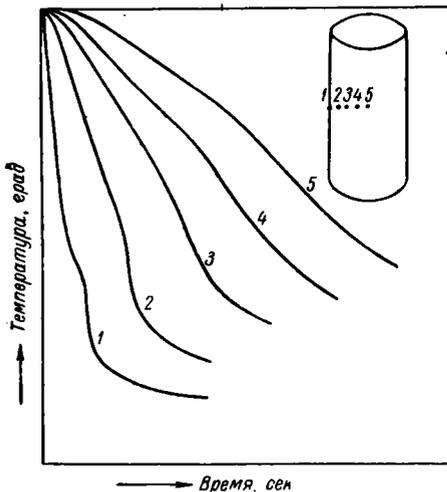


Фиг. 5. Кривая охлаждения поверхности 20-миллиметрового сферического железного образца в воде при 20°. Скорость циркуляции воды 25 см/сек.

Границы первичного падения температур поверхностей металлических образцов в низкокипящих средах

| Материал и размер образца в мм | Температура точки 2 (фиг. 5) в град. | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|----------|----------|--------------------------|
| | 5-процентный водный раствор NaOH | вода 20° | вода 80° | масло индустриальное 50° |
| Железный образец \varnothing 25 | 300 | 330 | 550 | 500 |
| Железный образец \varnothing 190 | 350 | 400 | | 550 |
| Серебряный образец \varnothing 20 | | 420 | 600 | 570 |

Наиболее характерным для более точных кривых охлаждения металлической поверхности в воде является расположение максимумов скорости охлаждения в области низких температур. Максимально быстрое охлаждение внутренних объемов толстых изделий в отличие от их поверхностей, наблюдается при высоких температурах. Уровень температуры будет тем выше, чем дальше от поверхности изделия расположен охлаждаемый объем.



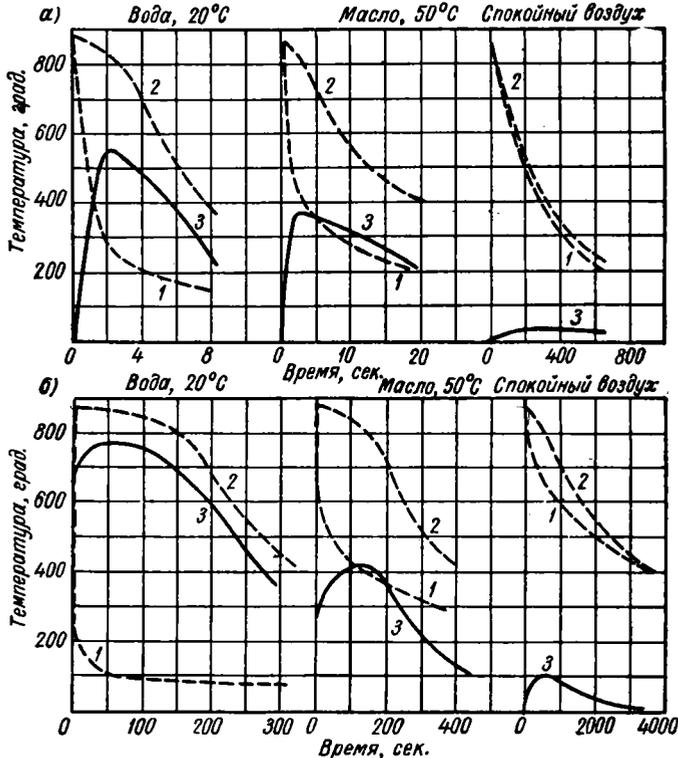
Фиг. 6. Кривые охлаждения поверхности и внутренних объемов стального цилиндра в воде (схема).

Из фиг. 6 видно, что в то время как на поверхности изделия температура снижается с большой скоростью, в середине ее охлаждение еще не начинается. Только после того как на поверхности температура сильно снизится, начинается снижение температуры центра. В период, когда на поверхности охлаждение идет с максимальной скоростью, скорость охлаждения в центре изделия незначительна. После снижения температуры и скорости охлаждения поверхности центр изделия, еще имеющий высокую температуру, начинает охлаждаться с максимальной скоростью.

Таким образом, начало и самый процесс охлаждения поверхности намного опережают начало и процесс охлаждения внутренних объемов изделий. Это опережение тем больше, чем больше эти объемы удалены от поверхности охлаждения (фиг. 6), или чем больше толщина изделия. В холодной воде центр большинства изделий наиболее интенсивно охлаждается тогда, когда температура

тура поверхности достигает $150\text{--}250^\circ$, а в масле наиболее интенсивное охлаждение центра соответствует температуре поверхности $250\text{--}450^\circ$.

Учитывая, что поверхность охлаждаемых изделий в воде и масле достигает указанных температур за время, не превышающее 2—3 сек., можно сделать вывод, что эвакуация основных



Фиг. 7. Температура поверхности (1), центра (2) и температурные перепады (3) сферических стальных образцов диаметром 25,4 мм (а) и 189,7 мм (б), охлаждаемых в воде, масле и воздухе [32].

количество тепла из закаливаемых изделий большого сечения осуществляется тогда, когда их поверхность имеет температуру ниже $400\text{--}450^\circ$ (фиг. 7). Вследствие этого при закалке изделий среднего и большого размеров, наибольшее значение имеет охлаждающая способность жидкости в нижнем интервале температур ниже 450° . Для мелких изделий, в которых не создается значительной разности температур поверхности и центральных зон, на результаты закалки оказывает влияние охлаждающая способность жидкости в более широком интервале от 700 до 200° ; при этом особенно сильно влияет охлаждающая способность в верхней части данного интервала.

588512

ГЛАВА II

ОЦЕНКА ЗАКАЛОЧНЫХ СРЕД

Сравнительные данные по охлаждающей способности закалочных сред нередко являются противоречивыми. Это в значительной мере объясняется различием оценочных характеристик, а также недостаточно удачным их выбором.

4. ОЦЕНКА ПО ТВЕРДОСТИ

Одной из наиболее старых и часто применяемых оценочных характеристик закалочных сред является твердость, измеряемая на поверхности закаленной стали или по глубине изделия. Эта характеристика, кроме охлаждающей способности среды, зависит от закаливаемости и прокаливаемости стали, которые определяются индивидуальными свойствами стали. Например, при охлаждении в воздухе, «закаливающая способность» которого при постоянных условиях охлаждения является совершенно неизменной, в разных сталях, различающихся по химическому составу, могут быть получены разнообразные структуры, начиная от перлита и кончая мартенситом.

Основной оценочной характеристикой закалочных сред, поэтому, должна служить не закаливающая, а охлаждающая способность, определение которой может совершенно исключать влияние индивидуальных свойств стали. Вместе с тем, использование метода твердости наряду с определением охлаждающей способности сред представляется весьма желательным в качестве дополнительного критерия, позволяющего более полно и всесторонне оценивать закалочные среды.

5. ОЦЕНКА ПО КРИВЫМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Охлаждающая способность сред изучалась многими исследователями. При этом выяснилось, что скорость охлаждения в различных областях температурного интервала охлаждения неодинаково влияет на успех закалки. Большинство исследователей в качестве характеристики закалочных сред использовали не всю кривую охлаждения, а только отдельные ее участки, которые считались наиболее важными.

М. Б. Пиллинг и Т. Д. Линч [41] в качестве критерия оценки охлаждающей способности сред использовали скорость охлаждения при 700° ; Матьюас и Стаг принимали продолжительность охлаждения в интервале $650-370^{\circ}$, а А. Портвен и Гарвен — в интервале $700-200^{\circ}$. В одной из наиболее ранних работ по средам М. Г. Ле-Шателье [35] таким наиболее важным интервалом выбрана область от 700 до 100° .

В. И. Просвириин и В. Н. Новиков [20], В. Я. Скотников [23] и др. исследовали закалочные среды так называемым калориметрическим способом и в качестве оценочного критерия использовали скорость отдачи тепла охлаждаемыми образцами исследуемой среде в различные периоды охлаждения. Такой критерий недостаточно четко выявлял некоторые особенности процесса охлаждения в различных средах, так как температура больших объемов жидкости при охлаждении в них образцов небольших размеров изменялась незначительно.

Вследствие этого исследования закалочных сред с помощью обычного калориметра, а также критериев, основанных на определении количества тепла, отдаваемого охлаждаемыми образцами средам, распространения не получили.

6. ОЦЕНКА ПО СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ 720°C

Значительное распространение в работе многих исследователей получила оценочная характеристика закалочных сред, введенная Г. Френчем, который использовал скорость охлаждения центра стального образца при 720° . По мнению автора, эта скорость определяет скорость охлаждения изделия при низких температурах, если при этом отсутствуют фазовые превращения. Г. Френч, кроме того, считает, что эта скорость «создает стремление к закалке», в то время как последующее охлаждение определяет степень происходящей закалки.

Следовательно, рассматриваемый критерий в известной степени должен определять «закалывающую» способность сред. Эти основные положения автор подтверждает результатами закалки образцов преимущественно из углеродистой и частично из хромистой стали.

Кроме прямого экспериментального подтверждения, эти положения базируются еще и на следующем. Скорость охлаждения центров изделий при температуре 720° определяется мгновенным значением температурного поля, возникающего в изделии, которое, в свою очередь, определяется характером охлаждающей способности закалочной среды, а также размером, формой и тепловыми характеристиками материала изделий. Совершенно очевидно, что характер этого поля в момент, когда температура центра равна 720° , неизбежно должен предопределять ход дальнейшего охлаждения в интервале температур значительной ширины.

Г. Френчем получены также простые эмпирические формулы,

определяющие зависимость скорости охлаждения изделий от отношения площади их поверхности S к объему V , т. е.

$$W = k \left(\frac{S}{V} \right)^n$$

где n — показатель степени, а k — коэффициент, зависящие от свойств закалочной среды.

Экспериментальные зависимости такого вида получили значительное распространение и использованы во многих работах при расчетах охлаждения изделий, а также при расчетах прокаливаемости.

В частности, некоторые из упомянутых зависимостей положены М. Е. Блантером в основу при разработке им известной номограммы для расчета прокаливаемости стали в наиболее часто применяемых закалочных средах [1].

Номограмма не лишена недостатков, уже отмечавшихся А. Л. Немчинским [14]. Для изделий большой толщины (200—300 мм) из глубоко прокаливающихся сталей, закаливаемых в холодной воде и масле, по номограмме получаются данные, не согласующиеся с опытными.

На основании расчетных формул Френча и Клопша К. К. Клапцовым [10] построены номограммы для расчетов продолжительности охлаждения центра изделий различной формы при закалке их в воде, масле и воздухе. Опытные проверки номограмм К. К. Клапцова для изделий малой и средней величины подтвердили их достоверность и удобство в работе. При использовании же их для расчетов охлаждения толстых изделий получают некоторые отклонения от данных эксперимента в сторону завышения времени охлаждения.

То, что в обоих случаях практического применения критерия Г. Френча для изделий больших толщин обнаружилось расхождение с опытом, свидетельствуют об ограниченности самого критерия. На эту ограниченность указывал и сам Г. Френч, который считал, что ни одно из свойств кривой охлаждения не может дать полного представления об особенностях охлаждающей среды.

Таким образом, несмотря на значительные достоинства критерия Френча, заключающиеся в его простоте и возможности широкого практического использования, он все же не может считаться универсальным.

Критерий Гроссмана, также получивший широкое распространение, по замыслу должен представлять резкость закалки H . Последняя определяется закалкой в данной среде нескольких образцов различного сечения из одной стали: контролем твердости по их сечению, построением графика зависимости относительной величины незакаленной сердцевины от толщины образца и, наконец, сопоставления ее с эталонными кривыми для определения соответствующей величины H . В основе метода Гроссмана, предложившего свой критерий определения резкости закалки сред в связи с методикой определения прокаливаемости стали, лежит предполо-

| Способ охлаждения | Охлаждающая среда | | | |
|---|-------------------|---------|----------|-----------------|
| | воздух | масло | вода | соляной раствор |
| Охлаждение в спокойном охладителе | 0,02 | 0,30 | 1,0 | 2,2 |
| Образец перемещается с умеренной скоростью; охладитель неподвижный | — | 0,4—0,6 | 1,5—3,0 | — |
| Образец перемещается быстро; охладитель неподвижный | — | 0,6—0,8 | 3,0—6,0 | 7,5 |
| Сильное и очень сильное перемешивание или разбрызгивание охладителя | — | 1,0—1,7 | 6,0—12,0 | — |

Таблица 3

Относительная закаливающая способность сред [28]

| Закалочная среда | Относительная закаливающая способность при температуре в °С | | |
|---|---|------------|-----------------------|
| | 20 | 60 | 99 |
| Вода: | | | |
| спокойная | 1,0 | 0,44 | 0,07 |
| проточная | 1,01 | 0,46 | 0,08 |
| Водные растворы NaCl: | | | |
| 5-процентный спокойный | 1,12 | 0,62 | — |
| 5-процентный проточный | 1,14 | 0,72 | 0,14 |
| 10-процентный проточный | 1,23 | — | — |
| Водные растворы NaOH: | | | |
| 5-процентный спокойный | 1,17 | 0,78 | — |
| 5-процентный проточный | 1,20 | 0,90 | 0,20 |
| 10-процентный проточный | 1,20 | — | — |
| Масла: | | | |
| трансформаторное | 0,17 | Повышается | — |
| минеральное (машинное, олеонафт и др.) | 0,21—0,44 | | — |
| мазут | 0,36 | | — |
| растительное (хлопковое, льняное и др.) | 0,15—0,30 | | — |
| Воздух спокойный | 0,03 | | — |
| Расплавленные соли с циркуляцией | При 200° | 0,25—0,30 | При 260° 0,17—0,20 |
| Свинец спокойный | При 335° | 0,05 | |

жение, что охлаждение при закалке можно описать при помощи закона Ньютона, при усредненном коэффициенте теплоотдачи, не зависящем от температуры охлаждаемой поверхности, ее формы и размеров. Исходя из этого, Гроссман получил числовые значения H , представленные в табл. 2, которые, по его мнению, должны характеризовать закалочные среды.

В действительности, как видно из характера кривых зависимости скорости охлаждения в средах от температуры охлаждаемого изделия, предположение о постоянстве коэффициента теплоотдачи и независимости его от температуры охлаждаемой поверхности находится в резком противоречии с данными экспериментов. Поэтому использование критерия Гроссмана при точной оценке закалочных сред, а также при точном определении прокаливаемости стали не может быть оправдано.

Если коэффициенты, представленные в табл. 2, по причинам, указанным выше, и не пригодны для подробной характеристики сред, то в силу своей простоты и наглядности они с успехом могут быть использованы для приближенной оценки сред. Аналогичные коэффициенты для характеристики большого количества сред при разных температурах, полученные другими исследователями, даны в табл. 3.

7. ОЦЕНКА ПО СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ В ПЕРЛИТНОМ И МАРТЕНСИТНОМ ИНТЕРВАЛАХ ТЕМПЕРАТУР

Н. Энгель [31], Ф. Вефер [43], А. В. Смирнов и А. А. Бабошин [24], Д. Я. Вишняков [3] и другие исследователи использовали в качестве критерия при оценке закалочных сред величины скоростей охлаждения в перлитном и мартенситном интервалах температур 650—550° и 300—200°. Такие критерии значительно более точно характеризуют не только способность сред закалывать сталь, но и их способность вызывать образование закалочных трещин, и поэтому позволяют более обоснованно выбирать среды для закалки сталей, обладающих различной прокаливаемостью.

В результате работ Ф. Вефера и Н. Энгеля определены для указанных интервалов скорости охлаждения 7-миллиметрового сферического серебряного образца, представленные в табл. 4.

Данные таблицы, характеризующие наиболее часто применяемые для закалки среды, хорошо согласуются с данными практики.

8. ОЦЕНКА ПО КРИВЫМ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗЦА

Более полно охлаждающую способность закалочных сред характеризует зависимость скоростей охлаждения от температуры охлаждаемого образца, т. е. зависимость

$$v = f(t),$$

где v — скорость охлаждения образца в град/сек.;

t — его температура в град.

Скорости охлаждения 7-миллиметрового сферического серебряного образца в различных средах [31; 43]

| Охлаждающая среда | Скорость охлаждения в град/сек. в интервале температур | |
|--|--|---------------------------------------|
| | 650—550° | 300—200° |
| Вода при температуре: | | |
| 1° | 1250 | 4250 |
| 15,5° | 1000 | 1750 |
| 20°, дистиллированная | 570 | 1500 |
| 35° | 500 | 1500 |
| 50° | 220 | 700 |
| 74° | 140 | 370 |
| 100° | 25 | 40 (при 120° $v =$ =270 град/сек.) |
| NaOH 10-процентный | 8100 | 4000 |
| H ₂ SO ₄ концентрированная | 5400 | 300 |
| Ca(OH) ₂ насыщенная | 1100 | 3900 |
| Масло сурепное | 500 | 75 |
| Глицерин | 105 | 250 |
| Жидкий воздух | 70 | 65 |
| Воздух | 12 | 3 |

Основной особенностью таких кривых является то, что в них скорости охлаждения определяются не в функции времени, как это делал Ле-Шателье в 1904 г. и многие исследователи после него, а в функции температуры образца. Кривые были применены в 1919 г. Н. Б. Пиллингом и Т. Д. Линчем, а позже Ф. Вефером, Н. Энгелем, А. Розе [42], А. Н. Хазаном [26], И. И. Сидориным [22], Ю. М. Богатыревым и В. П. Плешачковой [2], автором [18] и др.

Наибольшую ценность имели бы кривые такого типа, построенные на основе измерений температуры поверхности образцов, так как они наиболее объективно характеризовали бы закалочную среду. Так как удовлетворительная методика для таких измерений не разработана, кривые $v = f(t)$ приходится строить на основе измерения не температур поверхности, а температур центров образцов. Для того чтобы в этом случае фиксируемые процессы наиболее точно отражали характер охлаждения поверхности, экспериментальные образцы делаются по возможности небольших размеров, из металлов, которые в процессе экспериментов не имеют фазовых превращений и обеспечивают постоянство состояния поверхности. Желательно, чтобы температуропроводность металла

была высокой, так как при этом резко снижаются искажения, вносимые вследствие тепловой инерции образца. Вместе с тем, размеры образца, во избежание получения пониженной стабильности результатов экспериментов, не должны быть слишком малыми. Различные исследователи для этих целей использовали сплавы никеля с кремнием, никеля с хромом, железо Армко, серебро, медь, сталь. Получение точных результатов записей температурных кривых при таких экспериментах обычно обеспечивается только при условии применения тонких малоинерционных термопар, привариваемых к образцу, а также точной малоинерционной аппаратуры для автоматической записи кривых охлаждения.

Для получения большинства кривых $v = f(t)$ Н. Энгель использовал 7-миллиметровые серебряные, а также 4-миллиметровые нихромовые сферические образцы. Подсчеты показывают, что температуры центра и поверхности для серебряного образца близки. Полученные данные о скорости охлаждения серебряного образца в различных средах в перлитном и мартенситном интервалах температур приведены в табл. 4.

Результаты определения скоростей охлаждения в различных средах центра 4-миллиметрового нихромового образца приведены в табл. 5. При использовании экспериментальных образцов диамет-

Таблица 5

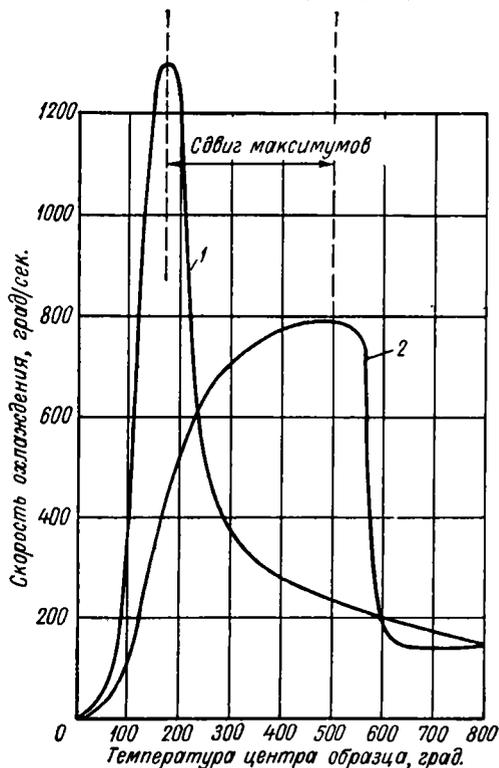
Скорости охлаждения 4-миллиметрового сферического нихромового образца в различных средах [31; 43]

| Охлаждающая среда | Скорость охлаждения в град/сек. в интервале температур | |
|---|--|----------|
| | 650—550° | 300—200° |
| NaOH 10-процентный | 3500 | 930 |
| NaCl 10-процентный | 3350 | 780 |
| Na ₂ CO ₃ 10-процентная | 2350 | 740 |
| H ₂ SO ₄ 10-процентная | 2350 | 1000 |
| Вода при 0° | 2050 | 800 |
| Вода при 18° | 1900 | 740 |
| Ртуть | 1400 | 370 |
| Вода при 26° | 1400 | 750 |
| Сплав из 70% Cd и 30% Sn при 180° | 1250 | 80 |
| Сурепное масло | 550 | 60 |
| Вода при 50° | 425 | 600 |
| Легкое масло люпекс | 400 | 160 |
| Глицерин | 380 | 520 |
| Медные плиты . | 160 | 45 |
| Мыльная вода . | 130 | 680 |
| Железные плиты | 90 | 20 |
| Четыреххлористый углерод | 90 | 130 |
| Вода при 74° | 75 | 640 |
| Вода при 100° . | 70 | 280 |
| Жидкий воздух | 50 | 15 |
| Воздух | 30 | 10 |

ром 4 и 7 мм вследствие недостаточно большой поверхности, результаты опытов, как видно из сопоставления данных для быстро охлаждающих сред, таких, как вода и водные растворы электролитов, не отличаются высокой устойчивостью, хотя абсолютные значения скоростей охлаждения получены очень высокие.

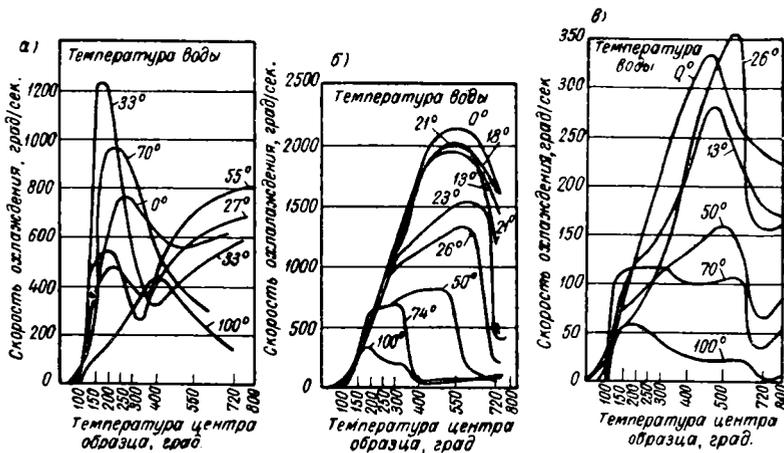
Между кривыми $v = f(t)$, полученными Энгелем [31] для серебряного и никромового образцов при их охлаждении в холодной воде, имеется принципиальное различие. Если у серебряного образца при высоких температурах наблюдается умеренное охлаждение с максимумами скоростей ниже 200° , то у 4-миллиметрового образца максимумы скоростей охлаждения получены при 500° и выше (фиг. 8). Это различие часто объясняют тем, что на серебряном образце якобы дольше удерживается паровая пленка, а на никромовом и железном она сразу разрушается. Однако это не совсем так. Как показывают прямые опыты, о которых говорилось ранее, паровая пленка устойчива на серебре, железе и никроме практически до одинаковых температур поверхности охлаждаемого образца (разница температур во всяком случае не превышает 70°). Относительное же смещение максимумов скоростей охлаждения серебряного и железного образцов в воде достигает 300° , т. е. оно почти в 4 раза больше.

Следовательно, основная причина смещения максимумов заключается не в различии критических температур, соответствующих смене режимов кипения на поверхности образцов, а в различии характеров фиксируемых процессов в образцах из железа и серебра, обусловленном огромной разницей в их тепловых сопротивлениях. Если термопарой в центре серебряного образца фиксируются процессы, близко отвечающие процессам охлаждения поверхности, то термопара в центре железного образца фиксирует процесс, типичный для сердцевины изделия и имеющий



Фиг. 8. Смещение максимумов кривых скоростей охлаждения 7-миллиметрового серебряного (1) и 4-миллиметрового никромового (2) образцов в воде при 50° .

очень мало общего с процессом на поверхности. Сравнение процессов охлаждения в воде центров серебряного и железного образцов одинакового размера подобно сравнению процессов охлаждения поверхности и центра изделия, которые, как указывалось выше, различаются не только темпом, но и положением максимумов скоростей охлаждения при резко различных температурах. Такое же смещение максимумов скоростей охлаждения, как это видно из фиг. 9, может возникать не только в результате замены



Фиг. 9. Сдвиги максимумов кривых скоростей охлаждения в сторону высоких температур, обусловленные родом материала и размером экспериментальных образцов: а — 4-миллиметровый образец из железа Армко; б — 4-миллиметровый образец из нихрома; в — 19-миллиметровый образец из железа Армко [31].

серебряного образца железным, но и в результате замены железного образца нихромовым, или просто при увеличении размеров железного образца, а также при резком изменении охлаждающей способности жидкости.

Смещение максимумов кривых $v = f(t)$ в сторону высоких температур может также получиться при охлаждении одного и того же образца в одной и той же среде в результате ухудшения контакта образца и термопары или вследствие повышения инерционности самой термопары [19].

Так как все указанные факторы обуславливают повышение перепада температур между центром и охлаждаемой поверхностью образцов, то можно сделать и более общий вывод, что величина смещения максимумов скоростей охлаждения на кривых $v = f(t)$ в сторону высоких температур при условии отсутствия образования на охлаждаемой поверхности пленок соли или окислов будет возрастать в результате воздействия всех факторов, способствующих увеличению температурного перепада по сечению охлаждаемого образца.

Все сказанное убеждает в том, что для более точной характеристики процесса охлаждения поверхности необходимо использовать либо очень маленькие образцы из железа, либо еще меньшие из нихрома, либо образцы несколько больших размеров из металлов с высокой теплопроводностью, таких, как серебро. Первые варианты не совсем удовлетворительны, так как малые образцы при наличии очень ограниченной поверхности в условиях охлаждения в закалочных средах не обеспечивают нужной воспроизводимости и стабильности опытов.

Поэтому, например, А. Розе при построении своих известных кривых $v = f(t)$ использовал 20-миллиметровый сферический серебряный образец. К сожалению, однако, использование для экспериментов только малоинерционного образца оказалось еще недостаточным для получения точных кривых $v = f(t)$. Максимум скорости охлаждения на кривых А. Розе для воды при 20° наблюдается при температуре центра образца около 500°.

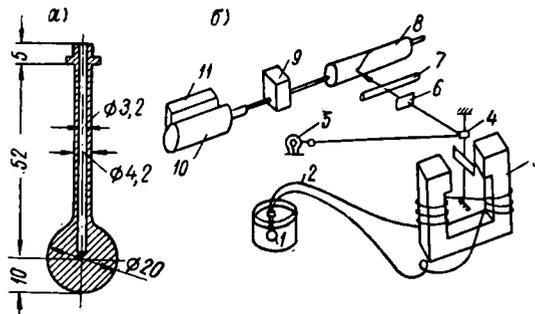
Так как тепловая инерция образца очень мала и величина температурного перепада между центром и поверхностью также невелика, получение максимума скорости охлаждения на поверхности образца при температуре около 500° возможно только при условии разрушения паровой пленки при этой температуре и наличия интенсивного теплоотвода за счет пузырчатого кипения. Последнее, как следует из сказанного выше, находится в резком противоречии с прямыми опытами, показывающими, что при температуре 500° паровая пленка в холодной воде еще очень устойчива и что разрушается она только при $\sim 250^\circ$.

Несоответствие кривых А. Розе основным положениям гидродинамической теории кризисов кипения объясняется недостаточно удовлетворительным контактом термопары с образцом. Термопара в опытах Розе не приваривалась, а погружалась в канал образца, заполненный порошком из серебра. В более поздних его кривых, приведенных В. Петером [34] в дискуссии по работе Г. Крайнера и К. Свободы, максимумы скоростей охлаждения 20-миллиметрового серебряного образца в холодной воде уже находятся при 340°, что значительно лучше согласуется с данными по критическим температурам кризисов кипения воды.

В наших опытах также использован 20-миллиметровый серебряный образец сферической формы. Хромелевый элемент термопары диаметром 0,3 мм приваривался в его центре; вторым электродом служил образец (фиг. 10, а). Нагрев образца всегда производился в электропечи до одной и той же температуры 800°; с помощью специального устройства образец автоматически перебрасывался в исследуемую жидкость, в которой он находился в неподвижном состоянии или перемещался по окружности с постоянной скоростью 25 см/сек. Запись температурных кривых производилась с помощью установки (фиг. 10, б), состоящей из короткопериодного гальванометра с частотой собственных колебаний подвижной системы 212 *цз*, равномерно вращающейся кассеты барабанного типа с фотобумагой и отметчика времени. Масштаб

кривых: по оси ординат в среднем 10 мм на 100° и по оси абсцисс — 80 мм на 1 сек. Скорости охлаждения определялись графическим дифференцированием в интервале от 800 до 100° через каждые 50°. Повторимость опытов была вполне удовлетворительной, и отклонение отдельных определений максимальных скоростей охлаждения обычно не превышало 1%.

Кривые зависимости скорости охлаждения серебряного образца от температуры его центра, т. е. кривые $v = f(t)$, являются уже достаточно полным и объективным критерием оценки охлаждаю-



Фиг. 10. Схема образца (а) и регистрирующей установки (б):

1 — охлаждаемый образец; 2 — термопара; 3 — короткоперодный гальванометр; 4 — зеркало гальванометра; 5 — осветитель; 6 — отметчик времени; 7 — конденсор; 8 — кассета; 9 — редуктор; 10 — электромотор; 11 — стабилизатор напряжения.

щей способности закалочных сред. Из всех скоростей охлаждения, представляемых этими кривыми в интервале 800—100°, наиболее важными для характеристики сред, используемых на практике, как указано выше, являются скорости охлаждения в интервале 450—150°. Ниже будут рассмотрены эти кривые.

9. ОЦЕНКА ПО КРИВЫМ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОУДАЧИ ОТ ТЕМПЕРАТУР ОХЛАЖДАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

На основании опытов по определению скоростей охлаждения центра 20-миллиметрового серебряного образца могут быть рассчитаны коэффициенты теплоудачи для различных периодов охлаждения. Возможность такого расчета обосновывается наличием настолько малых температурных перепадов между поверхностью и центром, что ими можно пренебречь. Расчет производится по формуле:

$$\alpha = v \frac{Gc}{\Delta t F},$$

где v — скорость охлаждения в град/сек.;

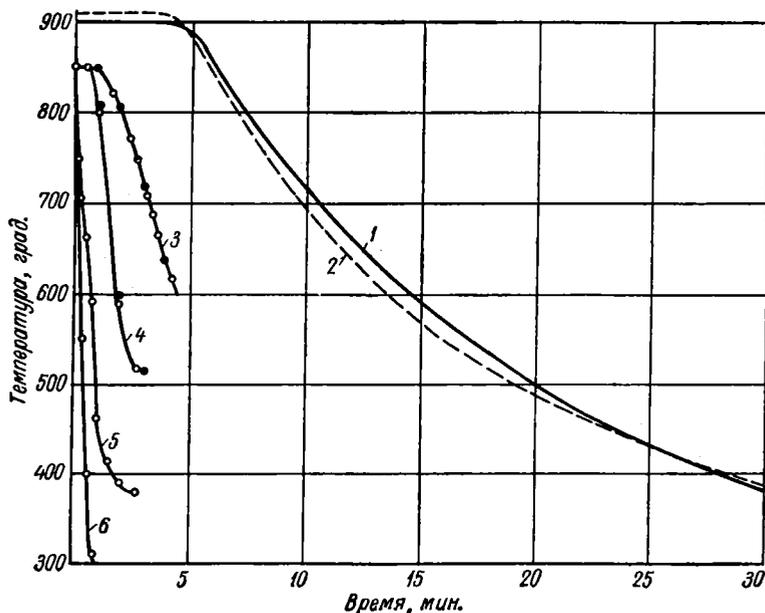
G — вес образца в г.;

c — теплоемкость в кал/г · град;

Δt — разность температур охлаждаемой поверхности и среды;
 F — охлаждаемая поверхность в $см^2$.

В этом случае охлаждающая способность характеризуется кривыми $\alpha = f(t)$, которые являются наиболее объективной характеристикой, мало зависящей от образца.

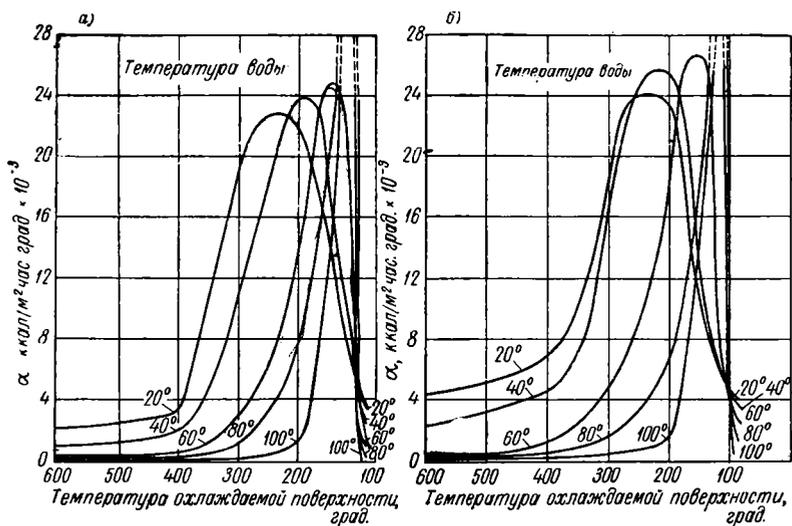
Помимо использования для характеристики охлаждающей способности закалочных сред, кривые $\alpha = f(t)$, как показали Г. Крайнер и К. Свобода, А. Л. Немчинский и др., могут быть использованы и для тепловых расчетов. Упомянутые исследователи показали, что с использованием известного метода конечных разностей



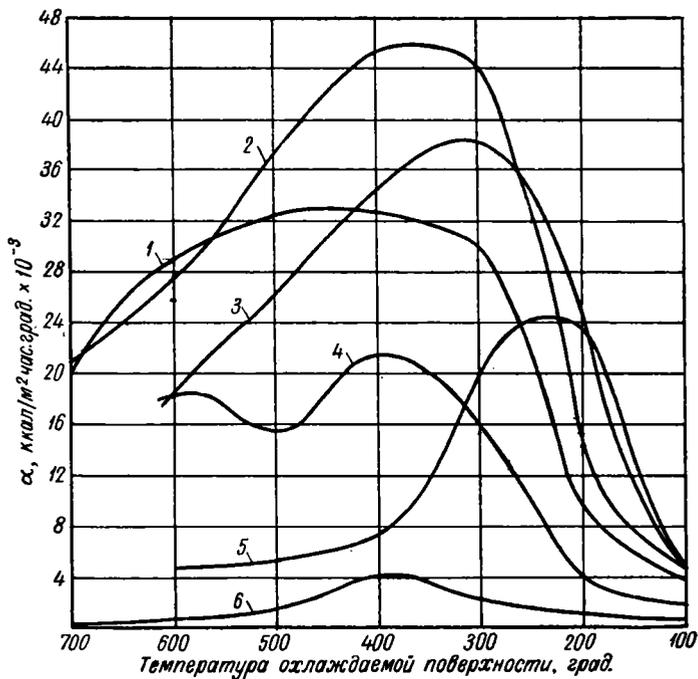
Фиг. 11. Кривые охлаждения плит:

1 — центра 200-миллиметровой стальной плиты в масле, опытные данные [34];
 2 — то же, расчетные данные [34]; 3 — центра 160-миллиметровой плиты
 в циркулирующей воде при 60° [14]; 4 — центра 80-миллиметровой плиты
 в масле [14]; 5 — поверхности этой же плиты в масле [14]; 6 — поверхности
 160-миллиметровой плиты в циркулирующей воде при 60° [14].
 ● — опытные данные; ○ — расчетные данные.

Е. Шмидта при наличии кривых $\alpha = f(t)$ представляется возможным вычисление при закалке кривых охлаждения центра и поверхности изделий, имеющих простую геометрическую форму (пластина, шар, цилиндр). При этом возможно также рассчитать процесс охлаждения любой точки объема охлаждаемого тела. Методика и примеры расчетов охлаждения изделий способом конечных разностей на основе коэффициентов теплоотдачи, определяемых охлаждением серебряного образца, подробно описаны в работе А. Л. Немчинского [14]. Совпадение результатов расчета с опытом,



Фиг. 12. Зависимость значений коэффициентов теплоотдачи в спокойной (а) и циркулирующей (б) воде от температуры охлаждаемой поверхности.



Фиг. 13. Зависимость значений коэффициентов теплоотдачи в водных растворах соли и щелочи от температуры охлаждаемой поверхности: 1 — 15-процентный раствор NaOH; 2 — 15-процентный раствор NaCl; 3 — 5-процентный раствор NaCl; 4 — 50-процентный раствор NaOH; 5 — вода при 20°; 6 — масло индустриальное 20 (веретенное 3).

как указывают упомянутые исследователи, получается удовлетворительным.

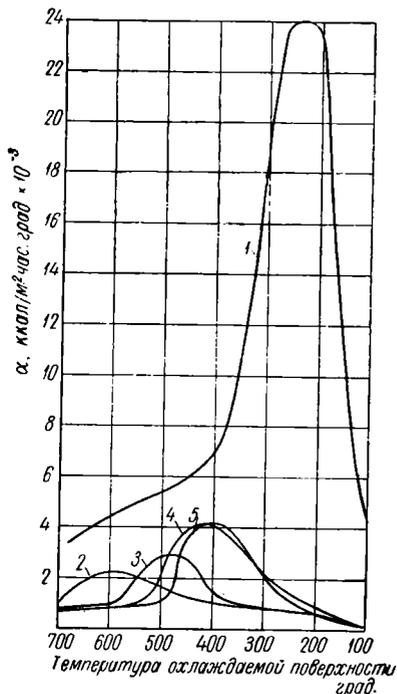
На фиг. 11 представлены расчетные и экспериментальные кривые по данным Г. Крайнера и К. Свободы, а также А. Л. Немчинского, полученным расчетом по методу Шмидта с использованием кривых $\alpha = f(t)$ А. Розе, А. Н. Хазана и автора.

Несмотря на удовлетворительные результаты такого метода расчета, он не лишен некоторых недостатков, обусловленных тем, что не учитывается зависимость коэффициентов теплоотдачи от формы и размеров изделий и, кроме того, не учитывается наличие на поверхности изделий окалины, теплопроводность которой в десятки раз ниже теплопроводности стали. К недостаткам данного способа расчета относится также его громоздкость. При всех недостатках, расчет охлаждения изделий методом конечных разностей с использованием коэффициентов теплоотдачи, определенных при охлаждении серебряных образцов, представляет большой интерес.

Коэффициенты теплоотдачи, полученные пересчетом кривых для различных сред, представлены на фиг. 12, 13, 14.

На фиг. 12 даны кривые $\alpha = f(t)$ для циркулирующей и неподвижной воды. В обоих случаях коэффициенты теплоотдачи при высоких температурах охлаждаемой поверхности имеют низкие значения, особенно для неподвижной воды. При низких температурах охлаждаемой поверхности, т. е. в конце охлаждения, они приобретают максимальные значения.

На фиг. 13 наряду с кривой для чистой воды даны кривые для водных растворов поваренной соли и едкого натра. Здесь же для сравнения приведена и кривая для минерального масла промышленного 20 (веретенного 3). Сравнение приведенных кривых позволяет видеть огромную разницу в охлаждающей способности этих сред. Отсюда же очевидна недостаточность характеристики охлаждающей способности сред одной цифрой — коэффициентом, который часто используется при сравнительной оценке закалочных



Фиг. 14. Зависимость значений коэффициентов теплоотдачи в минеральных маслах и воде от температуры охлаждаемой поверхности:

1 — вода при 20°; 2 — масло цилиндрическое тяжелое 52 (вapor); 3 — масло цилиндрическое легкое 11; 4 — масло промышленное 20 (веретенное 3); 5 — масло промышленное легкое Л.

сред. Это еще более четко видно из фиг. 14, на которой приведены кривые $\alpha = f(t)$ для минеральных масел и воды.

Из всего сказанного следует, что наиболее объективной и, вместе с тем, полной характеристикой охлаждающей способности закалочных сред следует считать серии кривых $\alpha = f(t)$ или $v = f(t)$ для сред, нагретых до разных температур.

В качестве дополнительной характеристики закалочных сред крайне желательно всегда иметь данные по закаливанию способности в виде кривых распределения твердости по сечению образцов различной толщины из двух-трех марок стали, резко отличающихся одна от другой по прокаливаемости.

ГЛАВА III

ОХЛАЖДЕНИЕ В СРЕДАХ НА ВОДНОЙ ОСНОВЕ

10. СВОЙСТВА ВОДЫ

Вода является самой старой из числа жидких закалочных сред. Выбор ее в качестве первой закалочной среды еще в древние времена объясняется большой распространенностью на земной поверхности. Однако длительное и успешное применение воды в качестве закалочной среды связано также с ее химическими и физическими свойствами. Вода отличается высокой устойчивостью химического состава при нагревах и охлаждениях, поэтому она имеет такое широкое распространение. Теплота испарения воды, равная при 0° 597 ккал/кг , значительно превышает соответствующие величины известных в настоящее время жидкостей при этой же температуре. С повышением температуры воды теплота испарения ее снижается и при 100° составляет 539 ккал/кг , при 140° — 512 ккал/кг , при 180° — 481 ккал/кг и при 374° (критическая точка) достигает нуля.

Вода характеризуется и большей, чем у всех веществ, теплоемкостью, равной $15^\circ 1 \text{ ккал/кг-град}$ и почти в 10 раз превышающей теплоемкость стали.

Температура кипения воды сравнительно низка и при давлении в 1 *ата* равна 100° . Упругость паров над холодной водой низкая; при 0° составляет 4,6 *мм рт. ст.* При нагреве она быстро возрастает, особенно между 50 и 100° . Значительное изменение температуры кипения воды растворением в ней солей, кислот и оснований затруднительно. Изменение барометрического давления в пределах 730—780 *мм рт. ст.* изменяет температуру кипения воды менее чем на 2° и не имеет существенного значения. Бóльшее повышение температуры кипения воды может быть достигнуто значительными изменениями внешнего давления. Например, увеличение давления вызывает соответственно следующее повышение температуры кипения:

| | при давлении | температура кипения |
|---------------|--------------|---------------------|
| 10 <i>ата</i> | | 179° |
| 20 | | 211° |
| 30 | | 233° |
| 100 | | 360° |

Теплопроводность воды, равная при 20° 0,52 ккал/м час град, по сравнению с другими жидкостями, является большой, однако по сравнению с теплопроводностью металлов она ничтожно мала. При нагревах воды до 100° теплопроводность ее возрастает до 0,59 ккал/м час град. Температуропроводность, равная при 20° $5 \cdot 10^{-4}$ м²/час, при нагреве до 100° слабо возрастает. Динамическая вязкость воды при 20° составляет 1 сантипуаз, а при нагреве до 100° снижается приблизительно в 3 раза. Поверхностное натяжение, равное при 20° 73 дн/см, при нагревах до 80° снижается до 62 дн/см. Диэлектрическая постоянная у воды очень большая. При 20° она равна 80,4, при 100° — 55,1.

Вода в реках, водоемах и водопроводах всегда содержит в своем составе соли, некоторое количество газов, поэтому она не является химически чистой. Более чистой является дождевая вода, однако и в ней имеются газы, а также взвешенные частицы. Химически чистой является только дистиллированная вода, тщательно освобожденная от газов.

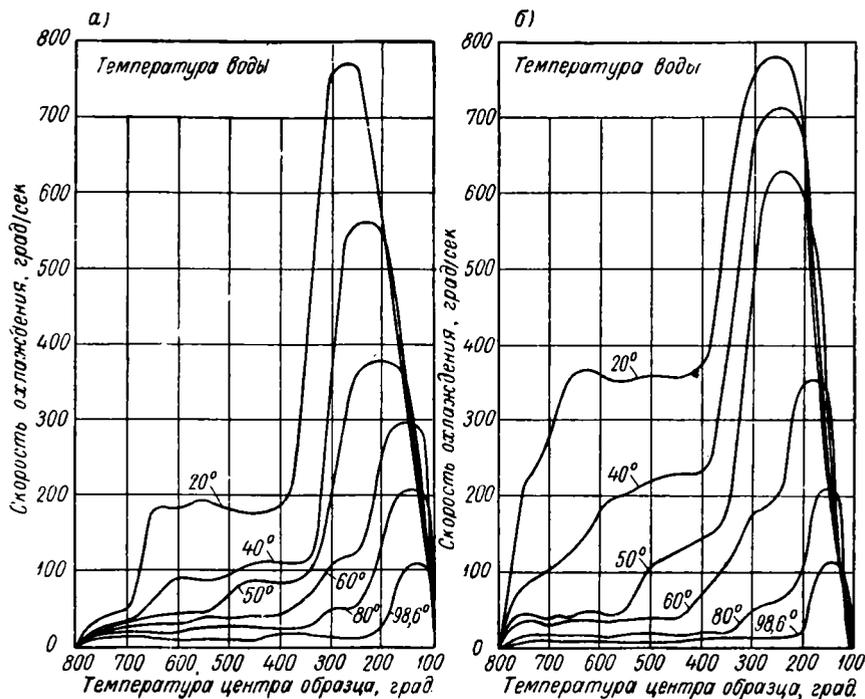
Для закалки обычно применяются речная или водопроводная вода, а также многочисленные растворы и эмульсии на ее основе. Эти закалочные среды являются дешевыми, негорючими и в большинстве своем имеют высокую охлаждающую способность. В период, когда для изготовления изделий применялись только углеродистые стали, вода была единственной или наиболее распространенной закалочной средой. Позже, особенно с появлением легированных сталей, наряду с водой широкое применение нашли растительные и затем минеральные масла. В последние десятилетия в связи с успехами в изучении процессов закалки и свойств закалочных сред, а также вследствие неудобств, обусловленных использованием масел, особенно при закалке крупных изделий, появилась тенденция к более широкому применению сред на водной основе. При закалке ряда крупных изделий из легированных сталей вместо охлаждения в масле применяется регулируемое охлаждение в воде или прерывистая закалка через воду в масле. Следует ожидать дальнейшего расширения области закалки в водных средах за счет некоторого сокращения объема закалки в маслах.

11. ОХЛАЖДЕНИЕ В СПОКОЙНОЙ ВОДЕ

Кривые, характеризующие охлаждающую способность мягкой воды ленинградского водопровода, приведены на фиг. 15. Вода при температуре 20° в интервале 800—400° ввиду наличия паровой пленки охлаждает сравнительно медленно; скорость охлаждения при этом не превышает 200 град/сек. По сравнению со скоростью охлаждения в масле эта скорость все же достаточно велика и близка к максимальной для масел. Наблюдаемая неоднородность скоростей охлаждения указывает на неравномерность процесса охлаждения в стадии пленочного кипения. Переход к пузырьчатому кипению начинается приблизительно при температуре 380°.

при которой наблюдается резкий подъем кривой. Эта температура несколько отличается от критической температуры в 250° (для меди), полученной косвенными способами. Учитывая различные условия экспериментов, это отличие следует считать незначительным.

После достижения максимума в 770 град/сек. скорости охлаждения быстро снижаются, что обусловлено уменьшением темпе-



Фиг. 15. Охлаждающая способность спокойной (а) и циркулирующей (б) воды. Образец серебряный сферический $\varnothing 20$ мм.

ратурного напора. Ниже 100° кипение прекращается, и теплоотвод по этой причине становится еще более медленным, однако при 100° скорость охлаждения все еще значительна и составляет 45 град/сек.

Таким образом, для холодной воды характерны:

1) быстрое охлаждение во всем температурном интервале охлаждения образца;

2) резкая неравномерность охлаждения в разных температурных интервалах, выражающаяся в резком отличии скоростей охлаждения в температурных интервалах $650-380^{\circ}$, $380-100^{\circ}$ и ниже 100° ;

3) наиболее быстрое охлаждение (770 град/сек.) при сравнительно низких температурах охлаждаемой поверхности.

12. ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА ВОДЫ

Чаще всего для закалки используется вода, имеющая температуру 15—30°. Однако на практике приходится пользоваться как более теплой, так и более холодной водой. Нередки случаи, когда вследствие недостаточного объема воды в закалочных баках средняя температура ее в начале охлаждения невысока, а в конце повышается до 60—70° и более. Даже при поддержании в течение всего процесса закалки средней температуры в пределах 15—30° слой воды, соприкасающийся с охлаждаемой поверхностью изделия, всегда бывают сильно перегреты вплоть до 100°. В тех случаях, когда не производится перемешивание воды или если отводу перегретой воды от охлаждаемой поверхности препятствуют неровности на охлаждаемой поверхности (следы механической обработки, рифление, накатка, нарезка и пр.), то, несмотря на низкую среднюю температуру воды в закалочном баке, охлаждение изделия или отдельных его частей происходит, как в подогретой воде. Этому сильно способствует также наличие на изделии сквозных и особенно глухих отверстий, внутренних углов, больших плоских горизонтальных поверхностей и т. д.

Кратковременная прочность резко закаленной стали, как показало исследование А. Л. Немчинского [13], оказывается сильно пониженной. В то же время эта прочность дополнительно снижается физико-химическим воздействием горячей воды.

При закалке изделий в небольшом объеме воды, как и при закалке изделий со сложным рельефом поверхности, ввиду изменения температуры воды могут иметь место оба фактора, способствующие снижению кратковременной прочности. При неблагоприятном распределении напряжений, обусловленных охлаждением в закалочной среде, на изделиях могут возникать закалочные трещины. Поэтому для термической обработки изделий зависимость охлаждающей способности воды от ее температуры представляет большой интерес.

Из кривых зависимости скорости охлаждения от температуры, приведенных на фиг. 15, видно, что охлаждающая способность воды сильно изменяется даже при незначительных повышениях ее температуры. Область температур теплоотвода пленочным кипением за счет резкого снижения скорости конденсации пара значительно расширяется. При охлаждении в воде 20° стадия пленочного кипения достигает 380°, а в кипящей воде 200°. Учитывая, что теплоотвод в этой области при повышении температуры воды с 20 до 100°, вследствие увеличения толщины паровой пленки и уменьшения тепла испарения снижается примерно в 45 раз, общая продолжительность охлаждения изделий в горячей воде сильно возрастает. Область пузырчатого кипения с нагревом воды становится более узкой, а максимальные скорости охлаждения в ней уменьшаются более чем в 7 раз. Так как положение максимумов на кривых $v = f(t)$ смещается при нагреве воды по шкале температур в область низких температур, скорости

охлаждения в этой области, соответствующей для многих сталей мартенситному превращению, остаются высокими.

При закалке изделий в горячей воде вследствие замедленного охлаждения их при высоких и быстрого при низких температурах тепловые напряжения получаются низкими, а структурные — высокими.

В связи с этим создаются условия для усиленного образования закалочных трещин, что в действительности подтверждается практикой, а также специально поставленными экспериментами [17].

Следовательно, во избежание закалочных трещин нагрев воды значительно выше температуры 30—40° не только мало эффективен, но даже вреден. А. Л. Немчинский считает, что на тонких изделиях толщиной менее 5—10 мм, а также на кромках толстых изделий, особенно из высокоуглеродистой стали, при повторных закалках в горячей воде без промежуточного отжига трещины получаются в меньшем количестве, чем при закалке в холодной воде. Однако при однократной закалке изделий уменьшение количества закалочных трещин за счет сильного нагрева воды обычно не отмечается.

Известно также, что многократные попытки существенно приблизить охлаждающую способность воды путем ее подогрева к охлаждающей способности масла успеха не имели.

Закалка изделий в очень холодной воде с температурой ниже 10°, как показывает опыт, также нежелательно вследствие резкого повышения тепловых напряжений, вызывающих увеличение коробления изделий.

Резкая зависимость охлаждающей способности воды от температуры является главным ее недостатком как охлаждающей среды.

13. ВЛИЯНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОДЫ

Работа образования сплошной паровой пленки на охлаждаемом изделии, как показал Кутателадзе [11], имеет тем большее значение, чем выше скорость течения жидкости. Следовательно, перемещение жидкости относительно охлаждаемой поверхности должно повышать критические температуры перехода одного режима кипения в другой. Перемещение жидкости до некоторой степени аналогично слабому повышению давления, которое также повышает значение критических температур кипения воды, если оно не превышает $\frac{1}{3}$ критического давления, т. е. если оно меньше 75,2 ата [6].

Для удобства выполнения экспериментов по исследованию влияния циркуляции на охлаждающую способность производилось при неподвижной среде перемещением по окружности охлаждаемого образца с постоянной скоростью в 25 см/сек.

Соответствующие кривые зависимости скоростей охлаждения образца от температуры его центра для воды, нагретой до различных температур, даны на фиг. 15.

Относительное перемещение образца и воды, как видно из приведенных данных, повышает равномерность охлаждения за счет значительного увеличения скорости охлаждения в интервале пленочного кипения. При этом максимальные скорости охлаждения в интервале пузырьчатого кипения остаются неизменными.

В воде, нагретой до 40, 50 и 60°, наряду с увеличением скорости охлаждения в интервале высоких температур, получено и значительное возрастание максимумов скоростей охлаждения. Что касается очень горячей воды, то ее охлаждающая способность в результате перемещения образца со скоростью 25 см/сек, остается без изменений.

Относительное перемещение образца и воды с более высокими скоростями, достигающими 300 см/сек, как показали опыты с тонкими платиновыми проволоками С. Сакуи и К. Сато, приводят к повышению скоростей охлаждения при пленочном и пузырьчатом режимах кипения более чем в 10 раз. Как известно из практики, циркуляция жидкости оказывает значительное влияние не только на скорость охлаждения, но влияет также и на равномерность охлаждения всей поверхности изделия, уровень получаемой твердости закаливаемого изделия, наличие мягких пятен, коробление, образование трещин и пр.

Например, А. Г. Онисимов [17] за счет повышения скорости циркуляции воды от 0 до 1 м/сек на образцах толщиной 10—12 мм из сталей марок 45, 40Х, У12 получил повышение твердости закаленной поверхности на 1—15 единиц H_{RC} и резкое повышение однородности в распределении твердости. Кроме того, при увеличении скорости циркуляции, как видно из табл. 6, значительно снизилось образование трещин на образцах.

Таблица 6

Влияние циркуляции закалочной среды на уровень твердости и образование закалочных трещин [17]

| Охлаждающая среда | Скорость циркуляции в м/сек | Сталь 45 | | | Сталь 40Х | | | Сталь У12 | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------|----------------------------|---------------|--------------------|----------------------------|---------------|--------------------|----------------------------|---------------|
| | | Твердость H_{RC} | число образцов с трещинами | | твердость H_{RC} | число образцов с трещинами | | твердость H_{RC} | число образцов с трещинами | |
| | | | квадратных 10 мм | круглых 12 мм | | квадратных 10 мм | круглых 12 мм | | квадратных 10 мм | круглых 12 мм |
| Вода | 0,0 | 55—60 | 2 | 0 | 52—56 | 3 | 1 | 48—65 | 0 | 0 |
| | 0,5 | 57—60 | 2 | 0 | 52—57 | 2 | 0 | 60—64 | 0 | 0 |
| | 1,0 | 59—62 | 2 | 0 | 58—60 | 1 | 0 | 63—66 | 0 | 0 |
| 50-процентный водный раствор NaOH | 0,0 | 59—61 | 0 | 0 | 58—59 | 0 | 0 | 66—67 | 0 | 0 |
| | 0,5 | 60—62 | 0 | 0 | 58—59 | 0 | 0 | 66—67 | 0 | 0 |
| | 1,0 | 60—62 | 0 | 0 | 58—59 | 0 | 0 | 67—68 | 2 | 1 |

Фронтальная сторона образца, перемещаемого в жидкости, охлаждается и закаливается сильнее, чем боковые, и тем более задняя сторона; скорость охлаждения и резкость закалки последней оказываются наименьшими. Твердость закаленных образцов из стали, содержащей 0,95—1,2% углерода, оказывается на передней поверхности больше, чем на задней, на несколько единиц H_{RC} . На задней стороне, кроме того, после закалки обнаружены мягкие пятна. Следовательно, на результаты закалки влияет не только скорость перемещения изделия, но и само направление движения. Последнее должно обеспечивать одинаковые условия омыwania водой различных участков поверхности закаливаемых изделий. Для этого перемещение изделий в воде должно быть не линейным, а в форме полной или неполной «восьмерки».

В случае циркуляции жидкости при неподвижном изделии движение ее должно быть таким, чтобы потоки равномерно омывали изделие со всех сторон. Наиболее удовлетворительным будет охлаждение при условии циркуляции жидкости и одновременного перемещения закаливаемых изделий.

Направление циркуляции в большинстве случаев желательно делать совпадающим с направлением тепловых потоков, т. е. снизу вверх. Скорость взаимного перемещения изделия и охлаждающей его жидкости не может увеличиваться беспредельно. Чрезмерно быстрое перемещение жидкости вдоль изделия переменного сечения способствует образованию в местах резкого изменения толщины, углублениях, внутренних углах и отверстиях завихрений жидкости, вызывающих ее местные перегревы. Такие перегревы обуславливают замедленное охлаждение, пониженную твердость, повышение уровня напряжений, коробление и образование трещин на изделиях. Поэтому скорость и характер циркуляции закалочной жидкости необходимо подбирать сообразно с размерами и формой закаливаемых изделий.

Особое внимание следует обращать на то, чтобы обеспечить равномерное омывание жидкостью изделий небольшой величины при их закалке погружением в бак большими партиями в приспособлениях. При этом необходимо сохранять достаточно большие зазоры между отдельными изделиями, а также между изделиями и приспособлениями, в особенности, если последние нагреваются до закалочных температур вместе с изделиями. Известно, что и процесс погружения закаливаемых изделий в воду оказывает решающее влияние на успех закалки. Поэтому для обеспечения нормального процесса охлаждения изделий в воде необходимо правильно погружать их в закалочный бак.

14. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ

Из практики, а также результатов исследований известно, что даже незначительные добавки к воде любых веществ, отличающихся от нее по химическому составу, существенно влияют на охлаждающую способность. Только кипяченая мягкая речная,

а также дождевая вода обладают такою же охлаждающей способностью, как дистиллированная. Водопроводная вода многих городов, а также грунтовые воды, содержащие незначительное количество растворенных солей, газов и взвешенных частиц, могут существенно отличаться по охлаждающей способности от дистиллированной воды и друг от друга.

Влияние добавок к воде на ее охлаждающую способность проявляется главным образом в изменении режима кипения и, следовательно, в изменении положения областей пленочного и пузырьчатого кипения.

По характеру влияния на устойчивость паровой пленки воды примеси могут быть разделены на две группы:

- 1) примеси, повышающие устойчивость паровой пленки;
- 2) примеси, снижающие ее устойчивость.

Вещества первой группы

К первой группе относятся все твердые и жидкие вещества, нерастворимые или мало растворимые в воде. Обычно при смешивании с водой они образуют взвеси типа суспензий и эмульсий с размером частиц более 100 *ммк* (глина, масла, нерастворимые в воде углеводороды, желатин, мыло). К этой же группе относятся, кроме того, газы и воздух. Эти вещества, в большинстве случаев являющиеся поверхностно активными, образуют значительное количество центров парообразования, ускоряют образование пара и снижают скорость его конденсации. Вследствие этого стойкость паровой пленки сильно возрастает, критические температуры кипения смещаются в область низких температур и охлаждающая способность воды резко снижается. Особенно сильно ее снижают добавки в воду масел и мыла. Попадание в воду масел, мазута, нефти в количествах, достаточных для образования на ее поверхности тончайшей пленки или самых незначительных количеств мыла, чрезвычайно резко снижает ее охлаждающую способность, обуславливает резкое снижение глубины закалки изделий и образование на них мягких пятен.

Поэтому воду в закалочных баках надо предохранять от загрязнения нежелательными примесями. Часто меры, предпринимаемые с целью повышения скорости охлаждения воды в закалочном баке, обесцениваются вследствие случайно попадающих в воду небольших количеств примесей, повышающих стойкость паровой пленки. Вредное влияние на закаливающую способность воды оказывают и растворенные в ней воздух и газы. Последние уменьшают скорости конденсации пара вследствие снижения его парциального давления и способствуют повышению устойчивости паровой пленки. Г. Френч [32], исследовавший влияние газов, указывает на то, что наиболее сильно снижает скорость охлаждения в воде растворенная в ней углекислота и значительно слабее воздух. На скорость охлаждения в воде, насыщенной углекислотой, значительное влияние оказывает, кроме того, и способ нагрева образца до закалочных температур, определяющий степень его

окисленности. Например, сталь, имевшая перед нагревом в печи синий цвет побежалости, охлаждалась в воде, насыщенной углекислотой, значительно медленнее, чем сталь, не имевшая такой пленки перед нагревом. На этом основании Г. Френч предполагает, что влияние на процесс охлаждения состояния поверхности (рельеф, наличие окислов), а также влияние насыщенности воды газами являются взаимосвязанными.

Нередки случаи, когда вследствие повышенной газонасыщенности воды изделия в ней не закаливаются и покрывающая их окалина приобретает специфический цвет, что указывает на химическое взаимодействие между окалиной и газами. Часто газонасыщенность воды приводит к образованию на закаленных изделиях мягких пятен. Хорошо известно, что в прокипяченной или ранее использовавшейся воде вследствие удаления газов закалка происходит значительно лучше, чем в свежей воде. Поэтому использование сжатого воздуха для перемешивания воды в закалочных баках, к которому нередко прибегают на заводах, не всегда желательно. В частности, в баках небольших размеров, при закалке изделий из углеродистой стали, отличающейся низкой прокаливаемостью, циркуляция жидкости с успехом может быть заменена перемещением самих изделий. Если перемешивание воды воздухом в некоторых случаях в больших закалочных баках и может быть допущено, то применение твердой углекислоты для охлаждения воды совершенно недопустимо.

С некоторым приближением в первую группу, кроме взвесей типа суспензий и эмульсий, могут быть отнесены также вещества, образующие коллоидные растворы с частицами размером 1—100 *мк*, более мелким, чем у взвесей, и более крупным, чем у истинных растворов. Характер влияния коллоидообразующих веществ желатина, глицерина, пектина и др. ближе к взвесям, так как большинство из них хотя и более слабо, но повышают устойчивость паровой пленки. В группу веществ, повышающих стойкость паровой пленки, могут быть отнесены и низкокипящие спирты — метиловый и этиловый.

Вещества второй группы

Ко второй группе могут быть отнесены вещества, снижающие устойчивость паровой пленки, повышающие температуры критических точек, соответствующих смене режимов кипения. Эта группа чаще всего включает растворенные в воде вещества, образующие с ней истинные или близкие к ним растворы, с размером растворенных частиц менее 1 *мк* (соли, щелочи, а также кислоты). Некоторые из таких веществ, например, минеральные соли и щелочи, приводят к мгновенному разрушению паровой пленки при погружении нагретого изделия в их водные растворы соответствующей концентрации. Такое разрушение пленки, резко изменяющее режим охлаждения, иногда объясняется механическим воздействием на нее окалины, отскакивающей от поверхности охлаждае-

мых изделий, или кусков соли [17, 29]. Более быстрое и энергичное отскакивание окалины в водных растворах щелочей объясняется действием газа (водорода), выделяющегося под окалиной и взрывающего ее.

Такая трактовка механизма разрушения паровой пленки в водных растворах не дает удовлетворительного объяснения многим явлениям, наблюдающимся на практике. Например:

1) неясно, почему паровая пленка, будучи механически разрушена окалиной, всегда образуется вновь, когда температура охлаждаемой поверхности под окалиной выше критической;

2) неясно, почему при устранении паровой пленки извлечением образца из жидкости она обязательно образуется вновь при повторном погружении образца в жидкость, если температура поверхности выше критической; то же самое наблюдается и в случае искусственного разрушения пленки;

3) непонятен эффект мгновенного разрушения паровой оболочки в соляных растворах на образцах, которые вовсе не имеют окалины (серебряных, никелевых, хромоникелевых и др.);

4) непонятно, почему разрушается пленка на серебряном образце при охлаждении его в растворах кислот; в этом случае отсутствуют толстые слои окислов, а также толстые соляные покровы.

Визуальное изучение рассматриваемого явления на охлаждаемом в жидкости образце, спроектированном на экран, а также анализ явления на основе современной гидродинамической теорий кризисов кипения с учетом фактов, наблюдающихся в практике, приводят к другому, более правдоподобному истолкованию механизма разрушения паровой пленки.

Ранее было указано на то, что паровая пленка всегда устойчива на металлической поверхности, если температура последней выше критической. Это обусловлено тем, что упругость пара внутри пленки, вследствие значительной скорости парообразования и недостаточно большой скорости конденсации, достаточно велика для того, чтобы уравновесить давление атмосферы и жидкости. По мере снижения температуры охлаждаемой поверхности толщина и устойчивость пленки в связи с уменьшением скорости парообразования и повышением скорости конденсации снижается. При достижении критической температуры пленка становится неустойчивой и разрушается самопроизвольно. Следовательно, основным условием разрушения пленки является снижение температуры поверхности до критических температур. Механическое воздействие на оболочку может несколько ускорить разрушение пленки только в том случае, если она уже находится в неустойчивом состоянии.

При введении в воду солей, щелочей и кислот повышается температура кипения воды и изменяются ее физические свойства. Критические точки, отвечающие смене режимов кипения, также смещаются в область повышенных температур. Это уже само по себе способствует более быстрому разрушению паровой пленки. Однако

этим влияние растворенных в воде электролитов не ограничивается.

При погружении нагретых изделий в растворы солей и щелочей на их поверхности (или на окалине, если она имеется на поверхности) отлагается, а в случае наличия агрессивных веществ образуется тонкий फिल्मый покров из твердых или расплавленных электролитов, имеющий пониженную теплопроводность. Этот покров играет роль теплового барьера. Резкое повышение теплового сопротивления охлаждаемой поверхности обуславливает почти мгновенное снижение ее температуры до критических значений, при которых паровая пленка теряет устойчивость и разрушается часто без внешнего на нее воздействия. Последнее соответствует замене пленочного режима кипения пузырьчатым.

Наиболее быстрое разрушение паровой пленки, сопровождающееся характерным хлопком, наблюдается при закалке в воде изделий, нагретых в соляных или щелочных ваннах и всегда имеющих теплоизоляционный покров из жидкой соли.

На охлаждающую способность воды добавки кислот действуют так же, как соли, но более слабо. Механизм разрушения паровой пленки в растворах кислоты аналогичен описанному. Но особенность его заключается в том, что теплоизоляционный покров охлаждаемой поверхности образуется не за счет отложения соли из раствора, а соль образуется на металлической поверхности от взаимодействия раскаленного металла с кислотой. Видимо различие в толщине и структуре соляных покровов, образующихся на металлической поверхности в соляных и кислотных растворах, является причиной их неодинаково энергичного воздействия на паровую пленку.

С точки зрения изложенного механизма разрушения паровой пленки в соляных и кислотных растворах образование на охлаждаемых поверхностях малотеплопроводного тонкого слоя окалины или другого теплоизоляционного материала должно способствовать разрушению паровой пленки и резкому ускорению процесса охлаждения. Наличие слишком толстого слоя прочно удерживающейся окалины должно, наоборот, замедлить скорость охлаждения даже при пузырьчатом кипении. Полное же отсутствие окалины и соляных покровов должно препятствовать снижению температуры поверхности вследствие повышенной устойчивости паровой пленки. Это и подтверждается специально поставленными экспериментами.

При охлаждении в воде 20° поверхностей стальных сферических образцов диаметром в 25 мм в зависимости от условий их нагрева до 875° получены различные скорости охлаждения (табл. 7). Наиболее быстро охлаждался образец, нагретый в соляной ванне и покрытый тонким слоем соли. Медленнее охлаждался образец, нагревавшийся в течение 10 мин. в воздухе и имевший тонкий слой окалины. Еще медленнее охлаждался образец, длительно нагревавшийся в воздухе, покрывшийся при этом толстым слоем окалины, и особенно образцы, нагретые в азоте и светильном газе,

Скорости охлаждения в воде в град./сек. поверхности стальных образцов [32]

| Способ нагрева и состояние поверхности образцов | Приблизительная скорость охлаждения при температуре | |
|---|---|----------|
| | 650—550° | 300—200° |
| В соляной ванне; поверхность покрыта слоем соли | 720 | 90 |
| В воздухе с выдержкой 10 мин.; на поверхности тонкий слой окалина | 450 | 80 |
| В воздухе с выдержкой 1 час; на поверхности толстая окалина, отвалившаяся при закалке | 300 | 50 |
| В азоте . | 200 | 70 |
| В светильном газе | 210 | 25 |
| В воздухе никелированного образца | 190 | 50 |

а также и никелированный образец, почти не имевший окислов на поверхности. Эти, на первый взгляд, неожиданные результаты, с точки зрения изложенного механизма разрушения паровой пленки, представляются вполне закономерными.

Образование на охлаждаемой поверхности окислов и отложений солей, имеющих пониженную теплопроводность, приводит к описанному явлению разрушения паровой пленки, которое обуславливает резкое ускорение охлаждения.

Образующиеся на охлаждаемой поверхности соляные покровы в период интенсивного перемешивания жидкости при ее кипении растворяются; дальнейший теплоотвод осуществляется без их тормозящего действия. Поэтому толщина соляных покровов играет подчиненную роль.

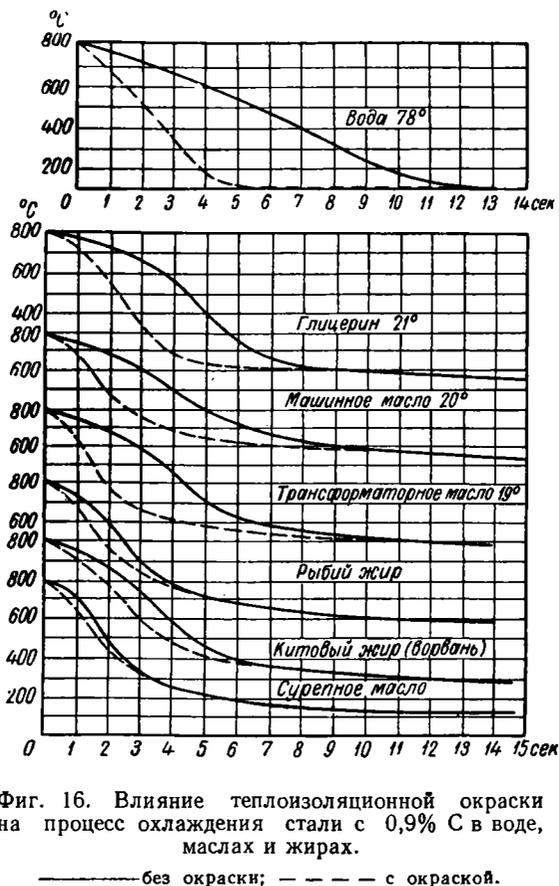
Совершенно иначе обстоит дело при образовании на охлаждаемой поверхности нерастворимых окислов и окалина, имеющих намного меньшую теплопроводность по сравнению с солями.

При наличии окислов скорость охлаждения в сильной степени зависит от толщины слоя, его структуры и главным образом устойчивости.

Тонкие окисные пленки обычно обладают значительной пластичностью и при закалке изделия с него не удаляются. Если в первый период они ускоряют охлаждение, способствуя разрушению паровой пленки, то после исчезновения паровой пленки они замедляют его. Следовательно, толщина окисных пленок должна сильно влиять на скорость охлаждения [40].

Окалина на изделиях, имеющая резко отличный от стали коэффициент термического расширения, обычно непосредственно после разрушения паровой пленки отскакивает и удаляется из изделия. В тех случаях, когда этого не происходит, или происходит слишком поздно, охлаждение сильно тормозится, что часто является

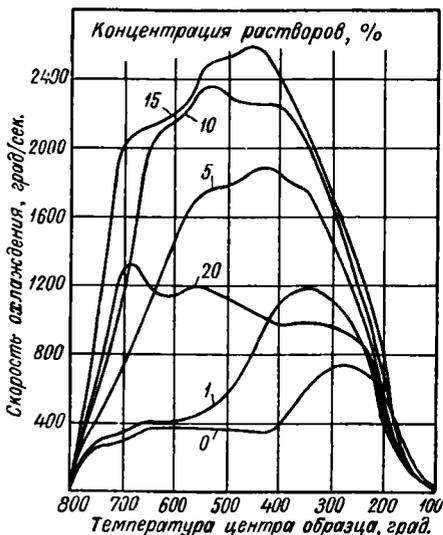
причиной плохой закалки. При охлаждении в воде отсутствие или задержка в удалении окалины обнаруживается по специфическому красноватому налету на изделиях. Кроме покровов соли, окисных пленок и окалины, разрушение паровой пленки и обусловливаемое им ускорение охлаждения достигаются и при наличии других покрытий охлаждаемой поверхности.



С. Сато, например, установил, что покрытие охлаждаемой поверхности изделий тонким слоем краски, состоящей из 75 г огнеупорной глины, 25 г графита, 14 г безводной буры, 30 г порошка точильного камня «тоноко» или карборунда и 200 г воды, как видно из фиг. 16, в несколько раз увеличивает скорость ее охлаждения в воде, водных растворах глицерина и маслах. Это явление, также кажущееся противоестественным, с точки зрения изложенного механизма разрушения паровой пленки вполне понятно.

15. ОХЛАЖДЕНИЕ В РАСТВОРАХ СОЛЕЙ

Наиболее часто для закалки применяются растворы поваренной соли. Растворимость ее в воде 20° невелика и составляет 26,4%. Снижение, а также повышение температуры на растворимость соли в воде влияют слабо: при 0° в воде растворяется 26,3% соли, а при 100° — 28,2%. Добавки соли в воду немного повышают теплоту испарения и изменяют другие ее физические свойства.



Фиг. 17. Охлаждающая способность водных растворов поваренной соли.

Образец серебряный сферический \varnothing 20 мм. Температура растворов 20°. Скорость перемещения образца $v = 25$ см/сек.

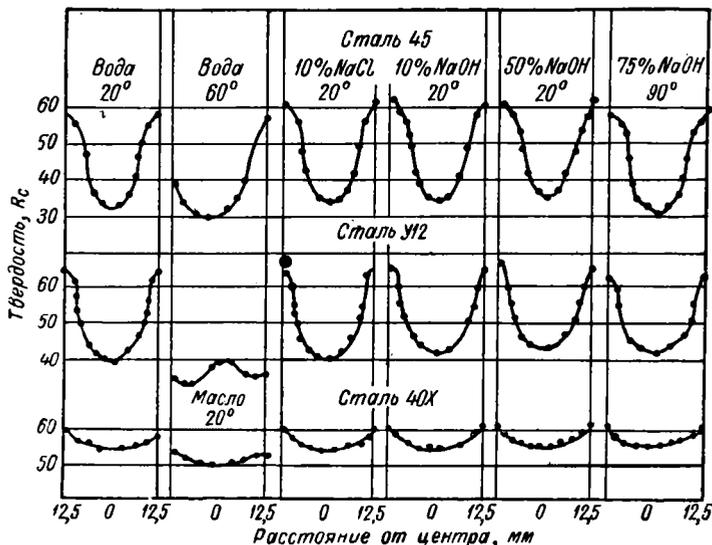
При растворении 25% поваренной соли в воде 20° плотность возрастает до 1,18 г/см³, вязкость до 1,6 сантипуазов, температура кипения до 108°. Изменяются также теплоемкость и теплопроводность. Перечисленные изменения свойств воды, за исключением вязкости, невелики и не могут сильно повысить ее охлаждающую способность, не изменяя коренным образом сам механизм охлаждения.

Влияние соли на охлаждающую способность воды сказывается не прямо, а косвенно, через посредство ее воздействия на устойчивость паровой пленки и изменение температурных границ пузырчатого кипения. Как видно из фиг. 17, добавка 1% поваренной соли приводит к существенному повышению скорости охлаждения образца при температурах выше 250°. Дальнейшее повышение концентрации соли еще больше расширяет интервал температур быстрого охлаждения. Начиная с 5-процентной концентрации растворов, паровая пленка разрушается почти мгновенно в момент погружения в них образцов. Наиболее быстрое разрушение наблюдается у 15-процентного раствора, который обеспечивает и более высокие скорости охлаждения.

Повышение концентрации до 17,5—20%, по всей вероятности, за счет резкого увеличения вязкости приводит к снижению скорости охлаждения и некоторому сужению интервала быстрого охлаждения. При низких температурах в интервале 300—200° охлаждение в растворах соли идет несколько быстрее, а ниже 200° — так же, как в воде, не содержащей соли.

Таким образом, главным отличием охлаждающей способности растворов соли по сравнению с водой являются резко повышенные скорости охлаждения при высоких температурах образца,

возникающие в связи с разрушением паровой пленки. Ввиду этого прокаливаемость сталей в растворах солей и щелочей, как видно из фиг. 18, выше, чем в воде. Устранение паровой пленки в результате добавки соли, кроме того, сильно повышает равномерность охлаждения, а также тепловые напряжения, и во многих случаях снижает суммарные растягивающие напряжения, которые вызы-



Фиг. 18. Прокаливаемость цилиндрических образцов диаметром 25 мм в воде, водных растворах соли и щелочи [17].

вают образование закалочных трещин. Влияние добавки соли на величину деформации видно из табл. 8.

Подробно добавкам поваренной соли на охлаждающую способность воды действуют и добавки других солей, хорошо растворимых в воде (соды, сернистого натрия, хлористого кальция).

В связи с повышением температуры водных растворов соли теплота испарения их снижается, и изменяется воздействие растворенной соли на паровую пленку. Это приводит к существенному изменению охлаждающей способности. Влияние температуры нагрева водных растворов соли на их охлаждающую способность, однако, сильно отличается от влияния нагрева на охлаждающую способность чистой воды.

Как видно из фиг. 19, повышение температуры 10-процентного раствора соли приводит к снижению высоких скоростей охлаждения в средней области температур. Ниже 250° скорости охлаждения изменяются мало. Нагрев воды сопровождается, как указано выше, снижением скоростей охлаждения при высоких температурах и стабилизацией их при низких температурах. Таким образом, небольшой подогрев приводит к выравниванию охлаждения в растворах соли и, наоборот, к резкому повышению неравномерности

Деформация колец при закалке в воде и водных растворах соли и щелочи (по А. Г. Онисимову) [17]

| Охлаждающая среда | Температура среды в °С | Скорость циркуляции в м/сек | Средняя величина расхождения губок в мм | Твердость H_{RC} |
|-----------------------------------|------------------------|-----------------------------|---|--------------------|
| Вода | 20 | 0,5 | +0,39 | 54—60 |
| | 60 | 0,5 | +0,425 | 53—59 |
| | 20 | 0 | +0,56 | 52—59 |
| 10-процентный водный раствор NaOH | 20 | 0,5 | +0,22 | 55—60 |
| 50- NaOH | 20 | 0,5 | +0,12 | 58—60 |
| 75- NaOH | 115 | 0,5 | +0,05 | 54—57 |
| 10- NaCl | 20 | 0,5 | +0,18 | 56—60 |
| Масло веретенное | 20 | 0,5 | -0,13 | 18—23 |

Примечание. Определение деформации производилось по расхождению губок разрезанных колец диаметром 57 мм с эксцентрично расположенным отверстием диаметром 31 мм.

охлаждения в чистой воде. Следовательно, добавки соли в воду несколько снижают зависимость ее охлаждающей способности от температуры.

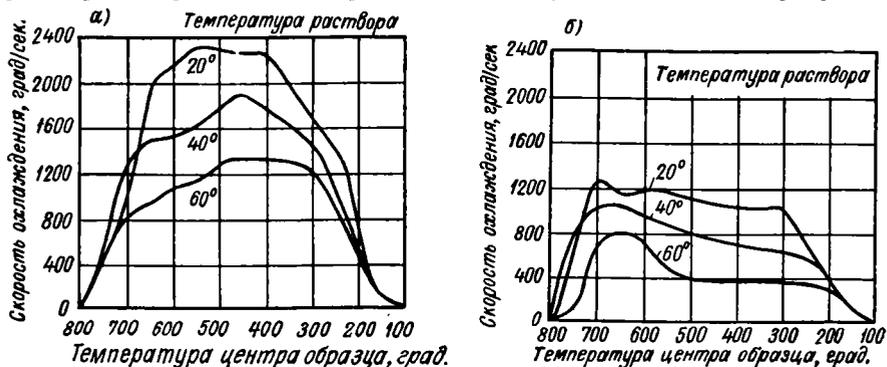
Несколько иначе ведет себя при нагреве более концентрированный 20-процентный раствор соли, отличающийся повышенной вязкостью (см. фиг. 19). В результате его нагрева снижение скоростей охлаждения при низких температурах образца здесь значительно больше, чем при высоких. Такое распределение скоростей охлаждения более благоприятно, так как предупреждает образование трещин. Однако вследствие повышенной вязкости этот раствор охлаждает недостаточно равномерно.

Наиболее высокой и равномерной охлаждающей способностью отличаются холодные 5—15-процентные растворы соли, которые хорошо зарекомендовали себя на практике. Такие изделия, как эталонные пластинки для прессов Бринеля и приборов Роквелла, к которым предъявляются повышенные требования в отношении равномерности их твердости на поверхности, обычно подвергаются закалке в соляных растворах.

Как показал А. Г. Онисимов [17], растворы солей дают возможность получать на изделиях не только более высокую и однородную твердость, но и значительно меньшее по сравнению с чистой водой количество закалочных трещин (см. табл. 6). Эти растворы применяются в инструментальном производстве при закалке

углеродистых и легированных сталей. Применение их при закалке конструкционных сталей пока что ограничено.

Приведенные данные позволяют рекомендовать 5—15-процентные холодные водные растворы поваренной соли для более широкого использования в инструментальном производстве, а также для прерывистой закалки изделий из конструкционной стали как малых и средних, так и больших размеров. Эти растворы особенно рекомендуются для прерывистой закалки изделий сложной формы, рельеф поверхности которых способствует местным перегревам



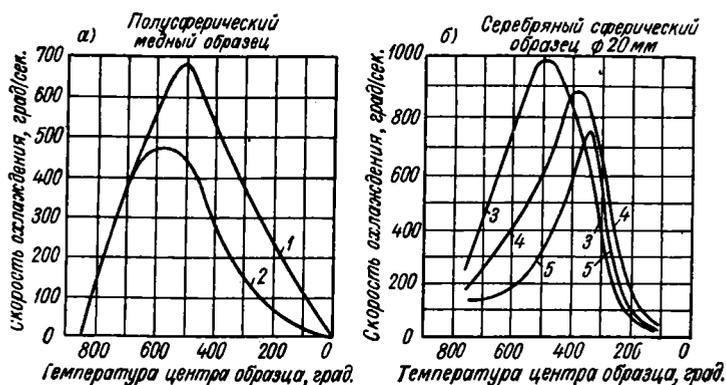
Фиг. 19. Изменение охлаждающей способности 10-процентного (а) и 20-процентного (б) водных растворов поваренной соли в результате изменения их температуры. Образец серебряный, сферический, \varnothing 20 мм. Скорость перемещения образца 25 см/сек.

жидкости и стабилизации паровой пленки. Водные растворы поваренной соли характеризуются удовлетворительной стабильностью состава и хорошими эксплуатационными характеристиками¹.

В последнее время некоторое распространение при поверхностной и частично объемной закалке получили растворы марганцевокислого калия KMnO_4 , предложенные Я. Ю. Авдиевым и Е. И. Малинкиной. Устойчивость KMnO_4 низкая, выше 200° он разлагается. Растворимость в воде невелика: при 20° — 6,4%, при 65° — 25%. При исследовании охлаждающей способности растворов марганцевокислого калия с использованием медного образца в виде полушферы, Ю. М. Богатырев и В. П. Плешачкова [2] получили зависимости, приведенные на фиг. 20, а. По данным авторов, концентрированный раствор KMnO_4 отличается от воды более низкими скоростями охлаждения в средней, особенно нижней, области температуры и, следовательно, имеет преимущества перед ней. Существенного влияния KMnO_4 на устойчивость паровой пленки, в отличие от других солей, авторами не обнаружено. Необходимые сравнительные данные по охлаждающей способности водных растворов KMnO_4 и растворов других солей, применяемых в промышленности,

¹ Наряду с растворами поваренной соли к более широкому применению могут быть рекомендованы и водные растворы соды Na_2CO_3 .

авторами не приводятся. Опытные данные, полученные с использованием 20 мм серебряного сферического образца, показали, что растворы $KMnO_4$ по охлаждающей способности не имеют никакого преимущества даже перед слабыми 5-процентными растворами поваренной соли (фиг. 20. б). В области низких температур раствор $KMnO_4$ охлаждает практически одинаково с раствором поваренной соли, а при высоких вследствие наличия более устойчивой паровой пленки — слабее. Растворы $KMnO_4$ опробованы при закалке некоторых изделий, причем существенного



Фиг. 20. Охлаждающая способность водных растворов марганцевокислого калия ($KMnO_4$), поваренной соли и воды: а — для медного полусферического образца; б — для серебряного сферического образца ϕ 20 мм:

1 — вода, 18°; 2 — вода + 5% $KMnO_4$, 30°; 3 — вода + 5% $NaCl$, 30°; 4 — вода + 5% $KMnO_4$, 18°; 5 — вода, 30°.

преимущества перед растворами $NaCl$ не найдено. Вместе с тем обнаружен серьезный недостаток растворов $KMnO_4$, заключающийся в недостаточно удовлетворительной стабильности их охлаждающей способности.

В связи с этим применение растворов $KMnO_4$ для объемной закалки недостаточно целесообразно. Значительно лучше вместо довольно дорогих растворов $KMnO_4$ использовать растворы поваренной соли, которые по охлаждающей способности и эксплуатационным характеристикам несколько им не уступают. В случаях, когда растворы поваренной соли не могут обеспечить удовлетворительных результатов закалки, следует применять растворы щелочей.

16. ОХЛАЖДЕНИЕ В РАСТВОРАХ ЩЕЛОЧЕЙ

Наиболее часто используются водные растворы едкого натра (каустика). Максимальная растворимость его в воде значительно возрастает с увеличением температуры и составляет при 20° 52,2%; при 100° 77,5%. Растворение 1% едкого кали в воде повышает

полную теплоту испарения при 20° на 36 кал/г. Повышение концентрации раствора с 1 до 40% сопровождается дальнейшим повышением полной теплоты испарения при 20° до 946 кал/г, увеличением вязкости с 1,016 до 2,770 сантипуазов и снижением теплоемкости с 0,971 до 0,683 кал/г. град. Температура кипения раствора едкого кали достигает 140° при концентрации 92,5%, а температура **раствора** едкого натра — 178° при концентрации 75%. Щелочи в воде могут растворяться в очень больших количествах. Добавки

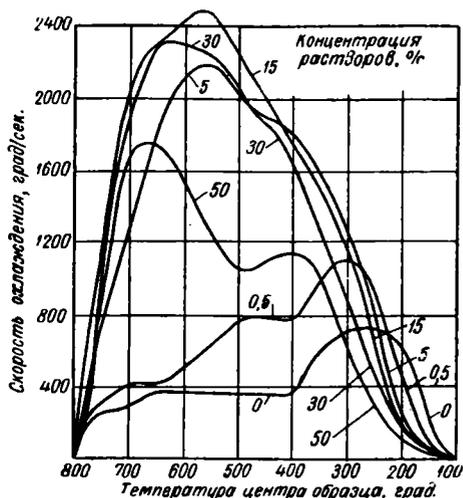
щелочей, как и солей, оказывают на теплоотвод главным образом косвенное влияние, воздействуя на устойчивость паровой пленки и характер режима кипения. Подобно соли, добавки к воде 0,5% едкого натра заметно расширяют область пузырьчатого кипения и повышают скорости охлаждения при температуре образца выше 250° (фиг. 21).

Введение 5% едкого натра обеспечивает почти мгновенное разрушение паровой пленки и переход к пузырьчатому кипению, сопровождающемуся быстрым охлаждением вплоть до 270°.

Как видно из фиг. 21, ниже 250° охлаждение в растворах щелочи идет намного медленнее, чем в воде. Это замедление охлаждения при низких температурах возрастает с увеличением концентрации растворов, и, следовательно, с повышением их температуры кипения. Начиная с концентрации 30%, вследствие значительного возрастания вязкости скорость охлаждения снижается не только при низких температурах, но и во всем интервале охлаждения. Наиболее отчетливо это наблюдается у раствора с 50% щелочи.

В последнем также наиболее четко выявляется наличие двух максимумов скорости охлаждения, указывающее на то, что разрушившаяся паровая пленка, видимо, на очень короткое время возникает вновь, после чего разрушается вторично. Этим объясняется специфический вид кривых $v = f(t)$ и у растворов других концентраций. Аналогичная, но менее ярко выраженная картина наблюдалась ранее на кривых водных растворов солей (см. фиг. 17).

Повышение температуры 50-процентного водного раствора NaOH сопровождается снижением скоростей охлаждения во всем



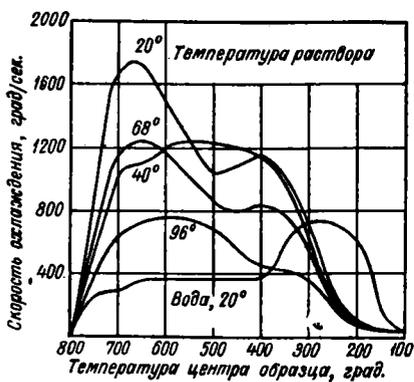
Фиг. 21. Зависимость охлаждающей способности водных растворов едкого натра от их концентрации при 20°.

Образец серебряный, сферический, Ø мм.
Скорость перемещения образца 25 см/сек.

интервале охлаждения. В области низких температур от 300 до 150° (фиг. 22) скорости охлаждения намного ниже, чем в воде. Это является огромным преимуществом растворов едкого натра средней и высокой концентрации.

Применять растворы едкого натра повышенной концентрации более целесообразно холодными. Как показывает опыт завода «Фрезер», возрастание их температуры выше 60° вследствие снижения охлаждающей способности приводит к образованию на изделиях мягких пятен.

Таким образом, быстрое и равномерное охлаждение образцов или изделий в холодных водных растворах едкого натра при высоких температурах охлаждаемой поверхности, и более медленное по сравнению с водой в области низких температур обеспечивает получение на поверхности изделий высокой и однородной твердости, а также резкое снижение трещинообразования, коробления и деформации при закалке.



Фиг. 22. Зависимость охлаждающей способности 50-процентного водного раствора едкого натра от его температуры.

Образец серебряный, сферический, $\varnothing 20$ мм. Скорость перемещения образца 25 см/сек.

Кроме того, растворы едкого натра имеют и другие преимущества. В результате взаимодействия с окисленной металлической поверхностью, сопровождающегося выделением водорода, происходит интенсивное отделение окалины, вследствие чего закаленные изделия приобретают серебристо-белый цвет и не требуют очистки. Несмотря на то, что водные растворы едкого натра служат прекрасной охлаждающей средой, в настоящее время их применение при закалке еще является ограниченным. Учитывая перечисленные положительные характеристики, эти растворы следует рекомендовать к более широкому применению при закалке изделий сложной формы, склонных к образованию закалочных трещин и значительному короблению. Для закалки сталей более высокой прокаливаемости рекомендуются растворы повышенной концентрации в 30—50%; для сталей с более низкой прокаливаемостью следует использовать более разбавленные растворы в 5—15%. Недостатком растворов едкого натра по сравнению с водой является их более высокая химическая агрессивность, требующая при работе с ними соблюдения мер предосторожности, а также применения вентиляции для отсоса паров. Кроме того, эти растворы с течением времени, а также в процессе работы вследствие поглощения углекислоты из воздуха изменяют свой состав и поэтому требуют систематического контроля и своевременной замены.

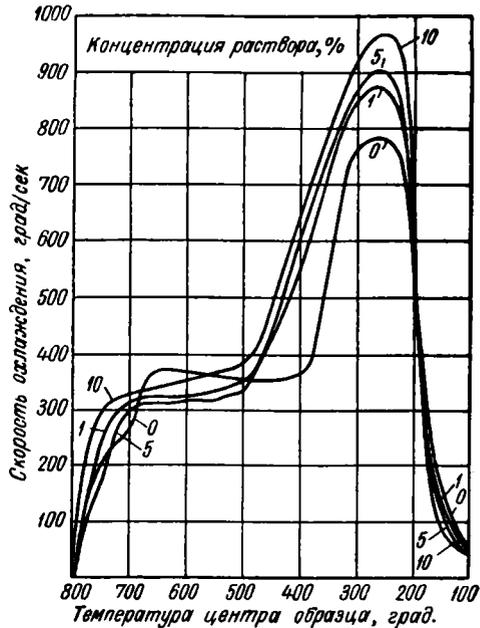
17. ОХЛАЖДЕНИЕ В РАСТВОРАХ КИСЛОТ

Введение кислот в воду, как уже было указано, приводит к значительно меньшему изменению охлаждающей способности воды, чем введение добавок солей и щелочей, что, по всей вероятности, объясняется неодинаковыми в этих случаях способами образования на охлаждающей поверхности теплоизоляционных соляных покровов, обуславливающих изменение режима кипения жидкости. Изменение охлаждающей способности воды в результате добавки соляной кислоты видно из кривых, приведенных на фиг. 23. Практически это изменение очень невелико и проявилось в некотором расширении стадии пузырьчатого кипения, а также в небольшом увеличении скоростей охлаждения в этот период.

Исследованные Ф. Вефером [43] 10-процентные добавки серной, а также ортофосфорной кислот при охлаждении 4-миллиметрового хромоникелевого шарика также не обнаружили большого влияния на охлаждающую способность воды. Положительной характеристикой кислотных растворов является интенсивное удаление окалины.

Вследствие повышенной агрессивности и вредности паров растворы кислот

редко применяются при закалке. Однако, если растворы кислот и не представляют большого практического интереса как закалочные среды, то некоторые из крепких кислот (например, серная) с теоретической точки зрения интересны как среды, охлаждающая способность которых близка к идеальной. Охлаждающую способность серной кислоты изучали Н. Пиллинг и Г. Линч [41], охлаждая цилиндрический никелькремниевый образец диаметром 6,4 мм и длиной 50 мм. Результаты их исследования представлены в виде графиков на фиг. 24, на которой приведено 6 кривых с различным положением горизонтальной оси. Очевидно, характерным для серной кислоты является: а) отсутствие пленочного кипения; б) более высокая, чем в воде, скорость охлаждения при высоких температурах; в) окончание кипения при повы-

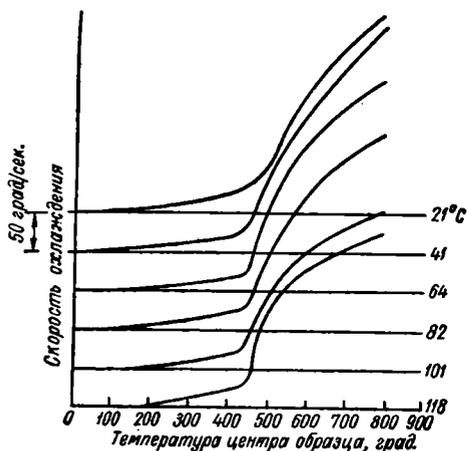


Фиг. 23. Охлаждающая способность водных растворов соляной кислоты при 20°

Образец серебряный, сферический, \varnothing 20 мм.
Скорость перемещения образца 25 см/сек.

шенной температуре и резко замедленное охлаждение ниже 400°; г) отсутствие зависимости охлаждающей способности от температуры ванны.

Эти результаты исследования согласуются с данными, полученными Н. Энгелем [31]. Любопытно, что теплота испарения серной кислоты составляет всего 122 кал/г, а у воды она равняется 538,9 кал/г; несмотря на это, кислота в период кипения охлаждает быстрее воды. Это указывает, что стабильность паровой пленки играет часто не меньшую роль, чем теплота испарения. По всей вероятности, необычайно быстрое начальное охлаждение



Фиг. 24. Охлаждающая способность серной кислоты при разных температурах [41].

Образец из сплава никеля с кремнием, \varnothing 6,4 мм, $l = 50$ мм.

бесцветную жидкость состава $C_3H_5(OH)_3$. Он плавится при 20°, кипит (с частичным разложением) при 290°, с водой смешивается в любых соотношениях.

Добавки в холодную воду 60% глицерина повышают ее вязкость с 1,006 до 10,55 сантипуаз и температуру кипения до 114,5° Теплота испарения при этом снижается с 584 до 552 кал/г, а теплоемкость — с 0,982 до 0,746 кал/г · град.

Даже небольшие добавки в 10—25% глицерина к воде (фиг. 25), наряду со слабым повышением температур кипения и небольшим снижением скорости охлаждения при низких температурах, вызывают резкое снижение скорости теплоотвода в период пленочного кипения. Добавки в 50 и 75% глицерина приводят к резкому снижению скорости охлаждения при температуре выше 500°, смещают максимумы скоростей охлаждения в область высоких температур и резко снижают скорости охлаждения при температуре ниже 350°. Концентрированный 90-процентный раствор охлаждает очень медленно в интервале температур 800—400° и несколько

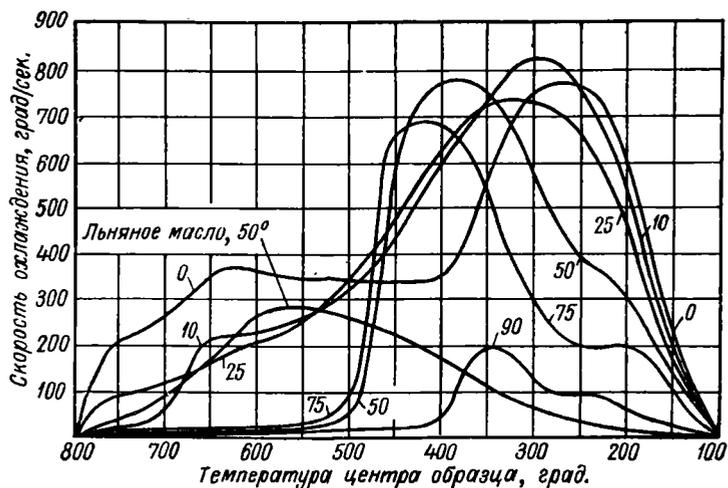
в серной кислоте обусловлено также очень быстрым образованием на охлаждаемой поверхности продуктов реакции, приводящих к практически мгновенному разрушению паровой пленки.

Не менее любопытным является также почти полная независимость скоростей охлаждения от температуры среды. Поэтому серная кислота как среда, охлаждающая способность которой близка к идеальной, представляет интерес.

18. ОХЛАЖДЕНИЕ В РАСТВОРАХ ГЛИЦЕРИНА

Глицерин относится к углеводородам группы спиртов и представляет собой вязкую

быстрее — при низких температурах. В растворах, содержащих 50% и более глицерина, обнаруживается тенденция к образованию двух максимумов скоростей охлаждения. Первый из них обусловлен кипением глицерина, второй — кипением воды. Из кривых фиг. 25 также видно, что путем добавки к воде глицерина получить охлаждающую среду, равноценную по охлаждающей способности маслу, невозможно. Однако, как указывает Скотников [23], изменением концентрации водных растворов глицерина можно добиться изменения их охлаждающей способности в довольно широких пределах.



Фиг. 25. Охлаждающая способность водных растворов глицерина различной концентрации при 20°.

Образец серебряный сферический, подвижный, \varnothing 20 мм; $v = 25$ см/сек.

Ю. Н. Богатырев и В. П. Плещачкова [2], исследовавшие охлаждающую способность водных растворов глицерина с использованием медного образца, в большинстве своих опытов не только не обнаружили существенного снижения скоростей охлаждения при повышении концентрации растворов с 10—15% до 40—45%, но, наоборот, во многих случаях при высоких, и во всех случаях — при низких температурах получили возрастание скоростей охлаждения.

Приведенные данные противоречат нашим, а также данным Н. Энгеля [31]; они не согласуются и с изменением физических свойств растворов, вызываемым повышением в них концентрации глицерина.

Из сказанного можно заключить, что охлаждающая способность воды снижается при введении в нее глицерина, особенно в верхней и нижней части температурного интервала охлаждения. Повышение температуры растворов глицерина приводит к дальнейшему снижению скоростей охлаждения.

Пониженные скорости охлаждения при низких температурах при общем достаточно высоком уровне скоростей охлаждения в концентрированных растворах глицерина указывают на возможность использования этих растворов при поверхностной и объемной закалке с душевым охлаждением вместо воды и эмульсии. Вследствие раздельного кипения воды и глицерина, а также в связи с гигроскопичностью последнего состав растворов глицерина в процессе работы и с течением времени изменяется. При работе с растворами глицерина состав их периодически должен контролироваться, например, по удельному весу. Температуру растворов в процессе работы желательно поддерживать в пределах 15—30°.

В связи с тем, что при нагревании растворов глицерина выделяются пары акролеина, желательно при работе с ними иметь вытяжную вентиляцию.

В целях использования положительного влияния щелочей на охлаждающую способность воды были сделаны попытки использовать добавки щелочи и в водные растворы глицерина. Водный раствор, содержащий 40% глицерина и 20% едкого кали, при 20° имеет сравнительно низкую теплоту испарения: 354 кал/г и высокую вязкость: 18,55 сантипуаза. Температура кипения раствора 115,5°. Однако тройные растворы указанного типа еще находятся в стадии опробования.

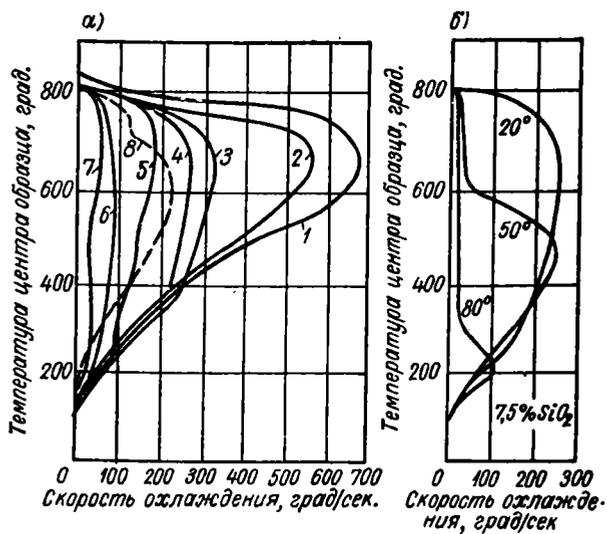
19. ОХЛАЖДЕНИЕ В РАСТВОРАХ ЖИДКОГО СТЕКЛА

Использование растворов жидкого стекла для закалки было предложено в 1931 г. Лукиным и Гамилем. Добавки в воду жидкого стекла принципиального изменения в характер кривых зависимости скорости охлаждения от температуры не вносят (фиг. 26, а). При достаточных концентрациях скорости охлаждения во всем интервале охлаждения снижаются. Наиболее существенное снижение отмечается при высоких температурах охлаждаемой поверхности, слабее — при низких.

Изменением концентрации растворов жидкого стекла можно в области высоких и средних температур изменять скорость охлаждения в довольно широких пределах. Однако, как и в растворах глицерина, получить при этом охлаждающую способность, полностью отвечающую охлаждающей способности масла, невозможно. Это видно хотя бы из того, что даже концентрированные растворы силикатов при низких температурах охлаждаемой поверхности охлаждают значительно быстрее масла. При нагревании эти растворы ведут себя подобно воде (фиг. 26, б). А. Розе указывает, что охлаждающая способность растворов, при прочих равных условиях, сильно зависит от соотношения между количеством кремнекислоты и щелочи. С повышением содержания кремнекислоты охлаждающая способность раствора снижается, а с повышением содержания щелочи — повышается. При сравнении натриевого и калиевого жидкого стекла оказалось, что по величине

скоростей охлаждения их водных растворов в области низких и высоких температур некоторое предпочтение следует отдать калиевому стеклу. Растворы калиевого жидкого стекла в области низких температур охлаждают медленнее аналогичных по концентрации и модулю растворов натриевого стекла.

Закаливающая способность растворов силиката натрия с модулем $M = \frac{Na_2O}{SiO_2}$, составляющим от $\frac{1}{1,15}$ до $\frac{1}{1,25}$, и удельным весом от 1,09 до 1,12 исследовались Н. А. Нерушем [27]. В завод-



Фиг. 26. Охлаждающая способность водных растворов жидкого стекла с отношением $\frac{SiO_2}{Na_2O} = 3,78$ при 20° (а) и при повышенных температурах (б):

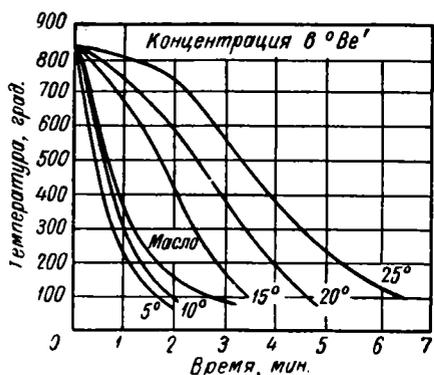
Содержание кремнекислоты: 1 — 1,7%; 2 — 3,4%; 3 — 5%; 4 — 7,5%; 5 — 10%; 6 — 15%; 7 — 20%; 8 — сурепное масло [42]. Образец серебряный, сферический, \varnothing 20 мм.

ских условиях в растворах закаливались изделия из стали марок У8; У12; ХГ; ШХ15; Р18 и др.; проверялось наличие трещин непосредственно после закалки, а также по истечении некоторого времени.

В результате работы установлено, что твердость закаленных изделий получалась такая же, как и после закалки в масле, а изделий из стали ШХ15 — даже выше, чем в масле. Равномерность твердости более низкая, чем после закалки в масле. Склонности к образованию трещин не обнаружено. Отмечены отсутствие нагара на изделиях, закаливаемых в растворах силиката, а также лучшее, чем при закалке в масле, отделение окалины и повышенные антикоррозионные свойства изделий. Силикатная корочка на изделиях устранялась промывкой. При протягивании конвейера через бак с растворами силиката натрия отмечено повышенное

трение в звеньях и увеличение их износа. Средняя стабильность растворов составила 1 месяц, но отдельные партии силиката обнаруживали пониженную стабильность.

Д. Я. Вишняков, исследовавший охлаждающую и закаливающую способность растворов силиката натрия различной концентрации в градусах Боме (Вé), получил представленные на фиг. 27 кривые охлаждения стального цилиндра диаметром 45 мм и длиной 100 мм. Из кривых видно, что при температурах образца выше 300°, за счет изменения концентрации силиката могут быть получены



Фиг. 27. Кривые охлаждения стального цилиндра (диаметр 45 мм; $l = 100$ мм) в растворах силиката натрия ($\frac{\text{Na}_2\text{O}}{\text{SiO}_2} = 1, 2, 3$) и в масле [3].

Коробление при закалке в растворах силикатов можно получить существенно меньшее, чем при закалке в чистой воде, но равномерность закалки, как уже отмечалось, получается худшая.

Состав и охлаждающая способность растворов жидкого стекла вследствие поглощения углекислоты из воздуха изменяется. Поэтому в процессе работы эти растворы должны систематически контролироваться ареометром и пробными закалками образцов, с последующим контролем их твердости по сечению.

20. ОХЛАЖДЕНИЕ В РАСТВОРАХ МЫЛА

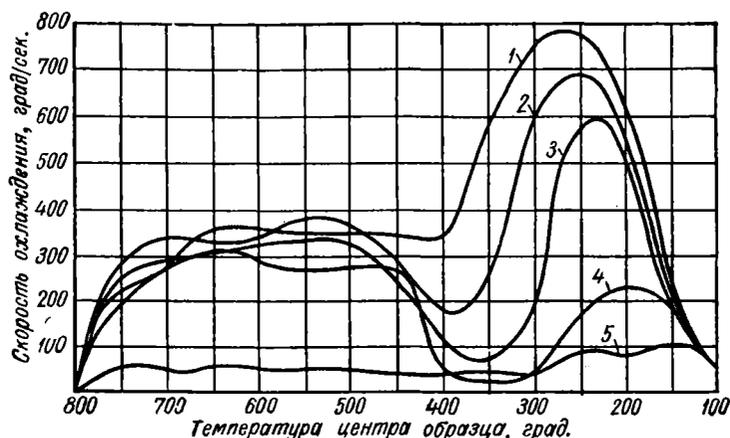
Мыло в воде не образует молекулярных растворов. Частицы его в растворе имеют большие размеры, вследствие чего раствор теряет прозрачность. Небольшие добавки мыла практически не изменяют ни температуры кипения, ни теплоты испарения воды. Однако влияние даже небольших добавок мыла на охлаждающую способность воды, вследствие резкого повышения стойкости паровой пленки, огромно.

Как видно из фиг. 28, появление в воде следов мыла в количестве 0,0001% вызывает образование минимума скоростей

скорости охлаждения, близкие как к скоростям при закалке в воде, так и к скоростям при закалке в масле. Однако ниже 300° центр образца во всех случаях охлаждается значительно быстрее, чем в масле, даже при 25° Вé — наибольшей из исследованных концентраций, при которых охлаждение в области высоких температур происходило медленнее, чем в медленно охлаждающем масле.

В связи со всем сказанным, растворы силикатов в воде могут найти лишь ограниченное применение — при закалке изделий, мало склонных к образованию закалочных трещин.

охлаждения при температуре в 400—350°. Замедление охлаждения при этом, по всей вероятности, является результатом увеличения толщины паровой пленки перед ее разрушением. Этот эффект при 0,01% мыла становится еще более сильным. Повышение концентрации до 0,5% очень сильно замедляет охлаждение при высоких и средних температурах образца; при низких оно такое же, как в чистой воде. Водные растворы мыла по своей охлаждающей способности подобны горячей воде. Так же, как в горячей воде, охлаждение в них характеризуется крайней нерав-



Фиг. 28. Охлаждающая способность водных растворов мыла концентрации:

1 — 0%; 2 — 0,0001%; 3 — 0,001%; 4 — 0,01%; 5 — 0,5%.

Температура растворов 20°. Образец серебряный, сферический, \varnothing 20 мм. Скорость перемещения образца 25 см/сек.

номерностью. При высоких температурах охлаждаемой поверхности они охлаждают медленно; при низких, наоборот, быстро. Эта неравномерность охлаждения при нагревании растворов возрастает. Поэтому закалка в растворах мыла часто сопровождается образованием закалочных трещин, значительным короблением и обычно характеризуется получением на поверхности неоднородной твердости, а также появлением мягких пятен.

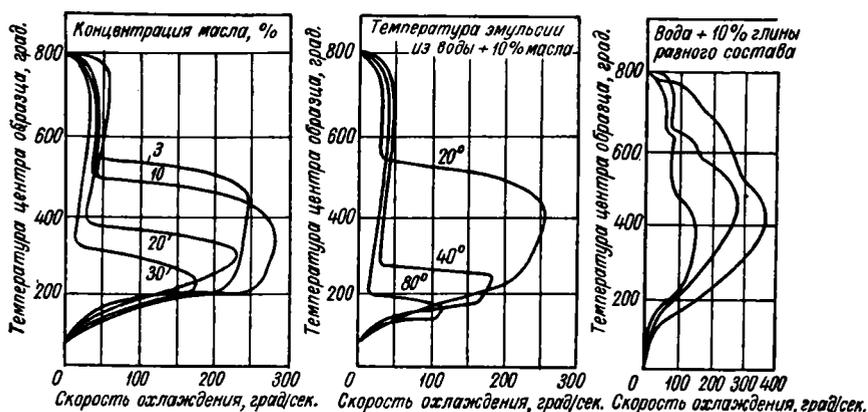
В связи с этим растворы мыла не могут быть рекомендованы в качестве закалочной среды, особенно для объемной закалки. Закалочные баки с водой следует предохранять от появления в них даже следов мыла.

Так как рассматриваемые водные растворы характеризуются повышенной охлаждающей способностью при низких температурах, их целесообразно применять в качестве охлаждающей среды при обработке металлов резанием.

21. ОХЛАЖДЕНИЕ В ЭМУЛЬСИЯХ И СУСПЕНЗИЯХ

Охлаждающая способность воды в несколько раз превышает охлаждающую способность масла. К числу множества сред, которыми пытались заполнить разрыв между ними, относятся смеси воды и масла — водно-масляные эмульсии.

Вследствие нерастворимости масла в воде, смешение их обычно достигается длительным перемешиванием. При этом мелкодробленые частички масла распределяются в объеме воды, которая в этих случаях играет роль основы, в то время как масло



Фиг. 29. Охлаждающая способность водно-масляных эмульсий (а, б) и суспензий; из глин разного состава (в).

Образец серебряный, сферический, \varnothing 20 мм.

является добавкой. Так как стойкость таких эмульсий против расслаивания невелика, для ее увеличения в эмульсии вводят небольшие добавки оксиполяризованного растительного масла или других стабилизаторов. Хотя стойкость их против расслаивания при этом повышается, она все же остается неудовлетворительной. Охлаждающая способность водно-масляных эмульсий изучалась многими исследователями, и результаты их работ в основном согласуются. Из кривых А. Розе $v = f(t)$ (фиг. 29) видно, что охлаждение в водно-масляных эмульсиях характеризуется расширенной областью пленочного кипения и низкими скоростями охлаждения при высоких и средних температурах охлаждаемой поверхности. При низких температурах эмульсии, подобно чистой воде, охлаждаются быстро. Охлаждающая способность эмульсий в области низких температур с повышением содержания в них масла от 3 до 20% повышается, а затем снижается. При высоких температурах скорости охлаждения получаются тем ниже, чем выше концентрация масла в эмульсии. На фиг. 29 показана зависимость охлаждающей способности эмульсий от температуры ванны. Она сходна с аналогичной зависимостью для воды, только выражена

более резко. Ю. М. Богатыревым и В. П. Плешачковой, использовавшими медный образец, получены аналогичные зависимости.

Подобными свойствами обладают и эмульсии получаемые из эмульсолов, а также эмульсии более сложного состава, например, из воды, масла и небольших количеств щелочи. Практически такими же или близкими свойствами обладают и эмульсии, составленные из других компонентов.

Таким образом, эмульсии по сравнению с водой характеризуются более резкой неравномерностью охлаждения и более резкой температурной зависимостью их охлаждающей способности. Эмульсии обладают примерно одинаковой с водой резкостью охлаждения при низких температурах и очень вяло охлаждаются при высоких температурах образца. Они в настоящее время имеют ограниченное применение при поверхностной закалке и душемом охлаждении, так как при обычных способах охлаждения не обеспечивают получения необходимой прокаливаемости и однородной твердости. Закалка в них связана со значительным риском получения закалочных напряжений, трещин, коробления, и деформации. При этом вероятность получения трещин при закалке в эмульсиях даже выше, чем при закалке в горячей воде.

Охлаждающая способность суспензий на водной основе также исследовалась А. Розе [42]. На фиг. 29 приведены полученные им кривые $v = f(t)$ суспензий 10-процентной концентрации различных веществ. Частицы их настолько малы, что в течение двух суток не осаждались из суспензии; это указывает, что устойчивость самих исследованных суспензий превышала устойчивость многих эмульсий. По охлаждающей способности суспензии, подобно эмульсиям, характеризуются сильной неоднородностью охлаждения, а также замедленным охлаждением при высоких температурах и ускоренным охлаждением при низких.

Таким образом, суспензии, как и эмульсии, по охлаждающей способности похожи на подогретую воду и по указанным причинам не могут быть рекомендованы к широкому использованию для охлаждения изделий способом погружения.

ГЛАВА IV

ОХЛАЖДЕНИЕ В МАСЛАХ

Несмотря на целый ряд недостатков: повышенную огнеопасность, более высокую стоимость, недостаточно удовлетворительную стабильность, более низкую охлаждающую способность — масла в качестве закалочных сред применяются весьма широко и занимают второе место после воды и водных растворов. Широкое применение масел в практике закалки объясняется особенностями охлаждающей способности, обеспечивающей резкое снижение образования трещин и закалочной деформации.

До 80-х годов прошлого столетия для закалки применялись исключительно растительные масла: льняное, сурепное, подсолнечное и другие, а также животные жиры: преимущественно свиной, говяжий, а также рыбий. Начиная с указанного времени, в связи с появлением на рынке значительного количества более дешевых нефтепродуктов, начинается их опробование и внедрение в практику закалки. В последние десятилетия растительные масла и животные жиры практически полностью вытеснены минеральными маслами. Последние, являясь более дешевыми, не уступают жирам и растительным маслам по охлаждающей способности и значительно их превосходят по стойкости в работе.

Большинство минеральных масел получается перегонкой мазута или очисткой высоковязкого остатка. Сланцевые и каменноугольные минеральные масла получают соответственно из сланцевой и каменноугольной смол.

В зависимости от способа получения, нефтяные масла подразделяются на дистиллатные, остаточные и смешанные. Большинство нефтяных масел, применяемых при закалке, являются дистиллатными и представляют собой смесь углеводородов парафинового, нафтенового, ароматического и нафтено-ароматического рядов, а также кислородных, сернистых и азотосодержащих производных этих углеводородов. Главную массу их составляют нафтеновые углеводороды. Состав минеральных масел обычно предопределяет уровень большинства их свойств: удельного веса, вязкости, температуры застывания и др. Высокой сложностью состава минеральных масел объясняется то, что они кипят не при одной температуре, а в довольно широкой области температур, положе-

ние и ширина которой определяются относительным количеством в масле углеводов различного химического состава.

В целях удаления продуктов, обуславливающих своим присутствием низкую противоокислительную и термическую стойкость масел, плохие вязкостные характеристики и повышенную химическую агрессивность, масла после их получения подвергаются очистке от асфальто-смолистых веществ, части углеводов с неблагоприятным строением, нафтеновых кислот, продуктов разложения нефти при перегонке, а также сернистых соединений.

Очистка, в значительной степени предопределяющая качество масел, производится одним из следующих способов [12]:

1) очистка серной кислотой с последующей обработкой щелочью (NaOH) или отбеливающими землями и промывкой водой;

2) очистка селективными растворителями — нитробензолом, фенолом или анилином, растворяющими вредные составные части масла или способствующими удалению их;

3) выщелачивание — обработка масла щелочью, предшествующая очистке серной кислотой. Производится для более полного удаления нафтеновых кислот. Масла, подвергнутые только щелочной очистке, называют выщелоченными;

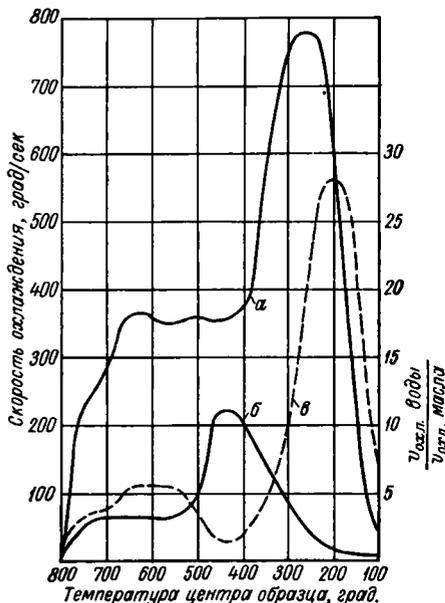
4) депарафинизация — охлаждение масла, растворенного в растворителе, с целью выделения и удаления парафинов и церезинов, повышающих температуру застывания;

5) деасфальтизация — очистка от асфальто-смолистых веществ осаждением их из масла, растворенного в растворителе (пропане).

22. ОСОБЕННОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ В МАСЛАХ

Кипение масел начинается при более высоких температурах по сравнению с водой. Разница в температурах кипения составляет 150—300°. Одновременно с кипением в маслах идет процесс разложения, поэтому на изделиях получается не паровая, как при охлаждении в воде, а газопаровая пленка. Последняя в маслах является устойчивой при более высоких температурах (450—700°), чем в воде. Устойчивость полностью теряется при 300—500°. Механизм разрушения пленки при охлаждении в маслах такой же, как и при охлаждении в воде. Режим пленочного кипения в маслах распространяется на более узкую область температур, чем в воде, например, в масле промышленном 20 (фиг. 30) с 750 до 500°. Соответственно, режим пузырьчатого кипения, а также максимум скоростей охлаждения относятся к более высоким температурам. Главное различие в расположении стадий охлаждения в воде и масле заключается в том, что режим конвективного теплообмена в маслах распространяется на более широкий интервал и захватывает более высокие температуры. В масле промышленном 20 режим конвективного теплообмена начинается приблизительно с 380° и распространяется до комнатных температур. Как видно

из фиг. 30, в воде этой области температур соответствует режим пузырчатого кипения, сопровождающийся наиболее быстрым охлаждением. Следовательно, если при охлаждении в воде интервал мартенситного превращения многих сталей совпадает с режимом наиболее быстрого охлаждения за счет пузырчатого кипения, то в маслах он совпадает с областью наиболее умеренного охлаждения за счет конвективного теплообмена.



Фиг. 30. Охлаждающая способность воды 20° (а), индустриального масла 20 (веретенного 3) 50° (б) и отношение скоростей охлаждения в воде и масле (в).

Образец серебряный, сферический, \varnothing 20 мм. Скорость перемещения образца 25 см/сек.

отличающихся от тех, которые получают при охлаждении в воде. Если температура поверхности в первые секунды после начала охлаждения в холодной воде снижается до весьма низких температур (170—350°), то при охлаждении в маслах это первичное снижение значительно меньше и температура поверхности изделий резко снижается за это же время до 600—400°. Следовательно, при охлаждении в масле перепад температур между поверхностью и центром, как правило, бывает намного ниже, чем при охлаждении в воде (см. фиг. 7). Наконец, одной из наиболее важных особенностей масел является очень слабая зависимость их охлаждающей способности от температуры.

В силу перечисленных особенностей масла выделяются в особую группу, отличающуюся от воды и сред на водной основе более умеренным и равномерным охлаждением, особенно в самой важ-

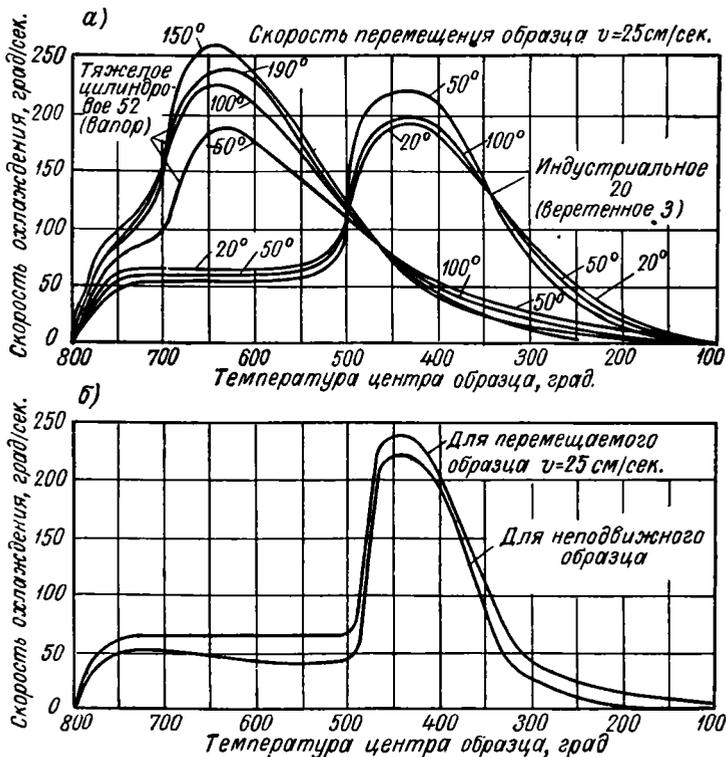
Важнейшей особенностью охлаждения в маслах по сравнению с охлаждением в воде являются резко пониженные скорости теплоотвода во всех и особенно в третьей стадии охлаждения. Как видно из кривой на фиг. 30, наибольшая разница в скоростях наблюдается при низких температурах и, например, при 200° скорость охлаждения в воде в 28 раз превышает скорость охлаждения в масле. При температурах выше 330 и ниже 100° отношение скорости охлаждения в воде к скорости охлаждения в масле снижается и не превышает 6.

Указанные особенности охлаждения в маслах обуславливают возникновение в крупных изделиях температурного поля, температурных градиентов, уровня и распределения закалочных напряжений, резко

ной, нижней области температур. Естественный разрыв между чрезвычайно высокой охлаждающей способностью воды и весьма умеренной охлаждающей способностью масел, к сожалению, несмотря на весьма многочисленные попытки многих исследователей, все еще остается незаполненным: буквально сотни закалочных сред, предлагающихся в качестве промежуточных между водой и маслом, по тем или иным причинам не удовлетворяют практику. Таким образом, эта очень актуальная проблема все еще ждет своего решения.

23. ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ МАСЛА

Как уже было сказано, температурная зависимость охлаждающей способности масел намного слабее, чем воды. Она несколько



Фиг 31. Изменение охлаждающей способности масел в зависимости от их температуры (а) и циркуляции (б). Образец серебряный, сферический, \varnothing 20 мм.

сильнее проявляется у тяжелых масел и более слабо у средних и легких. На фиг. 31 представлены кривые зависимости скоростей охлаждения от температуры среднего и тяжелого масел.

Скорости охлаждения в легком масле для высокоскоростных механизмов Л (велосите), за счет повышения его температуры с 23 до 100°, снижаются почти во всем интервале охлаждения на 5—15 град/сек. и в области максимума — на 30 град/сек. В масле индустриальном 20 (веретенном 3) в области средних и низких температур образца снижение скоростей охлаждения за счет подогрева масла немного больше.

При подогреве цилиндрического тяжелого масла 52 (вапор) с 50 до 150° скорости охлаждения в области высоких и средних температур образца повышаются на 25—75 град/сек. При дальнейшем повышении температуры масла до 190° скорости охлаждения опять снижаются на 5—25 град/сек. При температурах образца ниже 450° скорости охлаждения в масле при его нагреве снижаются тем больше, чем выше его температура. Рассмотренное изменение охлаждающей способности масел при их нагреве ничтожно мало по сравнению с изменением охлаждающей способности воды, скорость охлаждения в которой как видно из фиг. 15, за счет повышения ее температуры с 20 до 100°, при температуре образца 300° снижается в десятки раз.

На практике температуру закалочного масла в большинстве случаев удерживают на уровне 20—60°. Более низкие температуры масла обуславливают резкое повышение вязкости, снижение равномерности охлаждения и поэтому нежелательны. Значительный перегрев масел вплоть до 120—150° практически не влияет на их охлаждающую способность. Однако при перегревах возрастает опасность вспышки масла, и поэтому перегрев обычного закалочного масла выше 80—85° не допускается [27]. При изотермической и ступенчатой закалке применяются масла с высокой температурой вспышки. Их начальная температура может находиться в пределах 160—250°

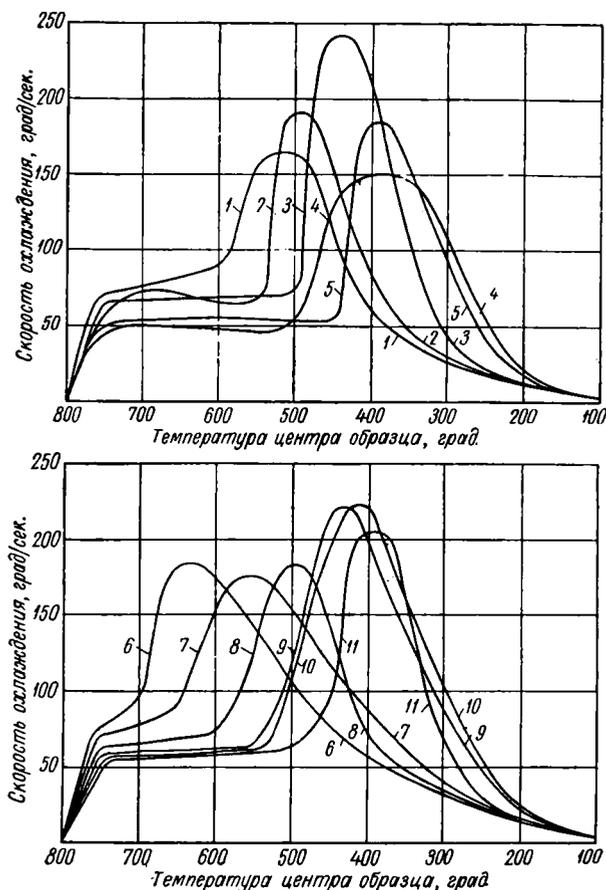
24. ВЛИЯНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ

Как видно из фиг. 31, перемещение образца со скоростью 25 см/сек приводит к повышению скоростей охлаждения во всем диапазоне температур охлаждения от нескольких град/сек. до 25 град/сек., т. е. значительно меньше, чем в воде (см. фиг. 15).

Относительно слабое влияние циркуляции на скорости охлаждения в масле в значительной мере обусловлено все той же слабой температурной зависимостью охлаждающей способности масел, а также более высокой, чем в воде, устойчивостью паровой пленки. Однако в практике перемещение изделий в масле или перемещение масла относительно изделия всегда производится с целью достижения более равномерного их охлаждения, а также для предотвращения местных перегревов масла, нежелательных как с точки зрения опасности пожара, так и с точки зрения ускоренного старения масла.

25. ОХЛАЖДЕНИЕ В МИНЕРАЛЬНЫХ МАСЛАХ

Охлаждающая способность закалочных масел в значительной степени зависит от их вязкости. Поэтому их в целях удобства желательно разделять на масла: пониженной, нормальной, повы-



Фиг. 32. Охлаждающая способность минеральных закалочных масел при температуре 50°:

1 — Автол АКЗП — 10; 2 — индустриальное 50 (машинное СУ); 3 — индустриальное 12 (веретенное 2); 4 — сланцевое; 5 — соляровое; 6 — цилиндрическое тяжелое 52 (вапор); 7 — цилиндрическое легкое 24 (вискозин); 8 — цилиндрическое легкое 11; 9 — индустриальное 20 (веретенное 3); 10 — индустриальное выщелоченное 20В; 11 — масло для высокоскоростных механизмов Л (велосит).

Образец серебряный, сферический, \varnothing 20 мм. Скорость перемещения образца 25 см/сек.

шенной и высокой вязкости. Табл. 9 характеризует основные физические свойства минеральных масел.

Кривые зависимости скорости охлаждения масел от температуры охлаждаемой поверхности приведены на фиг. 32. Наиболее часто для закалки изделий применяются масла нормальной вязко-

Закалочные масла

| Наименование масел | ГОСТ или технические условия | Вязкость ** при 50° | | Температура вспышки в град., не ниже | Кислотное число вмг КОН/г | Температура застывания в град., не выше | Удельный вес d_4^{20} в г/см^3 |
|---|------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---|---|
| | | кинематическая, в сст | условная, в град. В. У. | | | | |
| А. Масла пониженной вязкости * | | | | | | | |
| Масло для высокоскоростных механизмов Л (велосит) | ГОСТ 1840—51 | 4,0—5,1 | 1,29—1,40 | 112 *** | 0,04 | —25 | 0,865—0,885 |
| Масло для высокоскоростных механизмов Т (вазелиновое) | | 5,1—8,5 | 1,40—1,72 | 125 *** | 0,04 | —20 | 0,860—0,880 |
| Соляровое | 1666—42 | 5,0—9,0 | 1,39—1,76 | 125 | 0,025 | —20 | |
| Б. Масла нормальной вязкости | | | | | | | |
| Индустриальное 12 (веретенное 2) | 1707—51 | 10—14 | 1,86—2,26 | 165 | 0,14 | —30 | 0,876—0,891 |
| Индустриальное 20 (веретенное 3) | | 17—23 | 2,6—3,31 | 170 | 0,14 | —20 | 0,881—0,901 |
| Индустриальное выщелоченное 20В (веретенное 3В) | 2854—51 | 17—23 | 2,6—3,31 | 170 | 0,14 | —15 | — |
| Веретенное АУ | 1642—50 | 12—14 | 2,05—2,26 | 163 | — | —15 | |
| В. Масла повышенной вязкости | | | | | | | |
| Индустриальное 30 (машинное Л) | 1707—51 | 27—33 | 3,81—4,59 | 180 | 0,2 | —15 | 0,886—0,916 |
| Индустриальное 45 (машинное С) | | 38—52 | 5,24—7,07 | 190 | 0,35 | —10 | 0,886—0,926 |

Продолжение таблицы 9

| Наименование масел | ГОСТ или технические условия | Вязкость **) при 50° | | Температура вспышки в град., не ниже | Кислотное число в мгКОН/г | Температура застывания в град., не выше | Удельный вес d_4^{20} в г/см ³ |
|---|------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|---------------------------|---|---|
| | | кинематическая, в сст | условная, в град. В. У. | | | | |
| Индустриальное выщелоченное 45В (машинное СВ) | 2854—51 | 38—52 | 5,24—7,07 | 180 | 0,35 | —8 | — |
| Индустриальное 50 (машинное СУ) | 1707—51 | 42—58 | 5,76—7,86 | 200 | — | —20 | — |
| Г. Масла высокой вязкости | | | | | | | |
| Цилиндровое легкое 11 (2) | 1841—51 | 9—13 | 1,76—2,15 | 215 | 0,3 | +5 | — |
| Цилиндровое легкое 24 (вискозин) | | 20—28 | 2,95—3,95 | 240 | | — | — |
| Цилиндровое тяжелое 38 (цилиндровое 6) | 6411—52 | 32—44 | 4,5—6,0 | 300 | — | +17 | — |
| Цилиндровое тяжелое 52 (вапор) | | 44—59 | 6,0—8,0 | 310 | — | —5 | — |
| <p>* Применяются для приготовления смесей с более вязкими маслами. ** Вязкость цилиндрических масел определена при 100° С. *** Температура вспышки определена в закрытом тигле.</p> | | | | | | | |

сти. Охлаждающая способность, например, масла индустриального 20 характеризуется повышенными скоростями охлаждения в средней и низкой областях температур, которые, как указано выше, определяют способность масла быстро охлаждать средние слои изделий в перлитном и бейнитном интервалах температур. Ближайший заменитель этого масла — индустриальное 12 (веретенное 2) — незначительно уступает первому и поэтому применяется также довольно часто. Масло индустриальное вышелоценное 20В (веретенное 3В) по охлаждающей способности в области средних и низких температур несколько превосходит первые два масла и в то же время является более дешевым. Однако, так как это масло подвергается лишь частичной очистке, применение его в маслоохладительных системах большой емкости ограничено вследствие склонности его к образованию трудноудаляемых осадков. В баках небольшой емкости, очистка которых не представляет значительных затруднений, это масло может с успехом применяться. Масло веретенное АУ значительно дороже первых трех масел и уступает им как по охлаждающей способности, так и по значению температур вспышки.

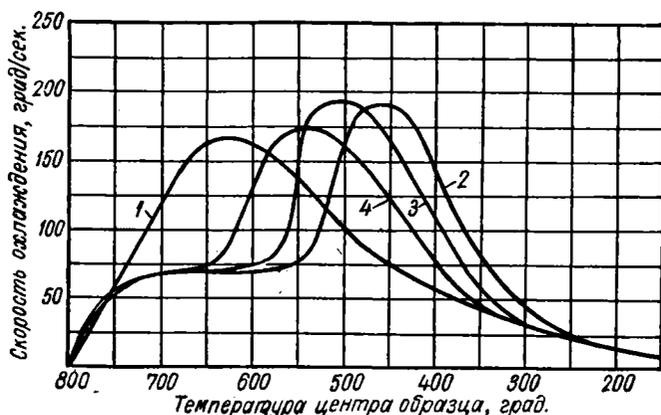
Масла пониженной вязкости обладают в основном более высокой охлаждающей способностью, особенно в области низких температур. Эти масла обладают пониженными значениями температур вспышки, вследствие чего они применяются при закалке только очень мелких деталей. Применение этих масел при закалке деталей средней величины в баках, емкость которых превышает 20 л, не рекомендуется. Если масла пониженной вязкости не совсем пригодны для закалки деталей в чистом виде, то они используются для составления смесей с маслами повышенной вязкости в целях получения масел нормальной вязкости.

Масла повышенной и высокой вязкости существенно отличаются от масел нормальной вязкости пониженными скоростями охлаждения в наиболее важных, нижней и средней областях температур. Наоборот, при высоких температурах охлаждающая способность их более высока. Такие масла поэтому редко применяются для обычной закалки в чистом виде. Масла высокой вязкости, обладающие очень высокими значениями температур вспышки (300—310° при определении в закрытом тигле) используются при изотермической и ступенчатой закалке тонких изделий из сталей с низкими значениями температур начала мартенситного превращения. Для этого они подогреваются до 160—230° и вязкость их при этом сильно снижается.

Выше уже упоминалось, что смешением масел повышенной и пониженной вязкости можно получить масла нормальной вязкости. Определение необходимых относительных количеств каждого из масел для получения смеси заданной вязкости производится по специальным номограммам [25]. Охлаждающая способность смеси двух масел различной вязкости, как видно из кривых на фиг. 33,¹ получается промежуточной между скоростями охлаж-

¹ Кривые получены совместно с А. Н. Хазаном.

дения компонентов. Аналогичные данные были получены и для смесей некоторых растительных масел с минеральными. Из полученных данных явствует, что смешением двух масел, отличающихся по значениям вязкости и характеристикам охлаждающей способности, нельзя получить смесь, охлаждающая способность или вязкость которой не являлись бы промежуточными между соответствующими характеристиками исходных масел. При смешении масел, кроме упомянутых характеристик, изменяются и все другие, в частности, температура вспышки. Следует при этом иметь в виду, что



Фиг. 33. Охлаждающая способность тяжелого цилиндрического масла 52 и легкого солярового масла, а также их смесей:

1 — тяжелое цилиндрическое масло 52; 2 — соляровое масло; 3 — смесь; 40% тяжелого цилиндрического масла 52 и 60% легкого солярового масла; 4 — смесь; 80% тяжелого цилиндрического масла 52 и 20% легкого солярового масла.

Образец серебряный, сферический, \varnothing 20 мм. Скорость перемещения образца 25 см/сек.

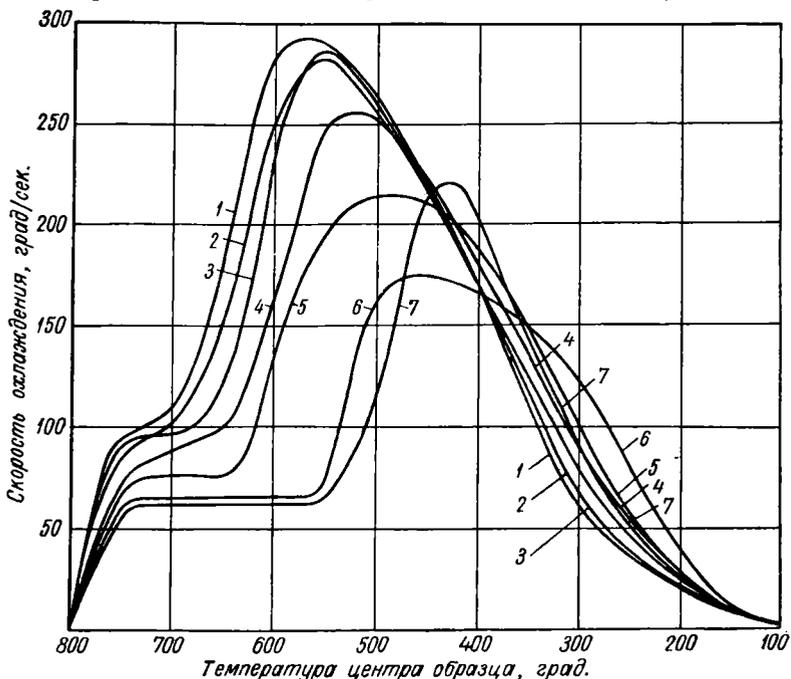
добавка в масло с высокой температурой вспышки масла с низкой температурой вспышки, даже в небольших количествах, образует смесь с существенно сниженной температурой вспышки. При этом, если вязкость смеси по упомянутым номограммам может определяться заранее, то температуру вспышки смеси определить заранее трудно, так как она определяется только опытом. Следовательно, при приготовлении масляных смесей всегда нужно считаться с возможным изменением температуры вспышки и предварительно ее определять опытом на пробных образцах, приготовленных в небольших количествах. Стоимость масел, перечисленных в табл. 9, колеблется в пределах 340—890 руб. за тонну. Эта стоимость в зависимости от дальности перевозки может изменяться. К наиболее дешевым относятся индустриальные масла, стоимость которых не превышает 480 руб. за тонну. Более дорогим маслом является тяжелое цилиндрическое 52 (около 890 руб. за тонну). Кроме масел, перечисленных в таблице, для закалки пригодны и некоторые другие масла, например, автолы АС-5; АК-6; АС-9,5 и пр. Однако эти масла вследствие более глубокой очистки или наличия специ-

альных присадок являются более дорогими, хотя и не отличаются высокой охлаждающей способностью или особо высокой температурой вспышки.

Для светлой заковки в некоторых случаях применяется светлое масло парфюмерное (ГОСТ 4285—54), однако стоимость его раза в два больше по сравнению с другими заковочными маслами. Более дешевые масла другого происхождения — сланцевые и каменноугольные — вследствие пониженной их температуры вспышки, за редкими исключениями, для заковки не применяются¹.

26. ОХЛАЖДЕНИЕ В РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЛАХ И ЖИРАХ

Растительные масла и животные жиры состоят главным образом из жирных кислот и глицеринов. Различие между отдельными



Фиг. 34. Охлаждающая способность растительных масел при 50°:

1 — льняное; 2 — подсолнечное; 3 — соевое; 4 — рапсовое; 5 — хлопковое; 6 — масло ваточника; 7 — индустриальное 20 (веретенное 3).

Образец серебряный, сферический, \varnothing 20 мм. Скорость перемещения образца 25 см/сек.

их видами определяется количественным и качественным составом входящих в них кислот. Удельный вес большинства растительных масел и жиров при 20° колеблется в пределах от 0,910

¹ Иногда, например, при заковке крупных шаров и подшипников применяется керосин. От масел низкой вязкости он отличается еще более высокой охлаждающей способностью при низких температурах и медленным охлаждением при высоких температурах.

до $0,920 \text{ г/см}^3$, а условная вязкость при 50° обычно составляет 2,8—3,5 град. В. У Температуры вспышки у большинства из них такие же, как у тяжелых минеральных масел и составляют обычно $220—300^\circ$. При нагревании до $240—250^\circ$ большая часть растительных масел и жиров кипит и разлагается с выделением газа и пара. Так как процесс разложения идет довольно быстро, то стойкость их в условиях многократных нагревов оказывается ниже по сравнению с минеральными маслами. Это обстоятельство, а также более высокая их стоимость и, наконец, неизбежное образование нагара на деталях обусловили необходимость почти полной замены при закалке растительных масел и жиров минеральными маслами. Однако на охлаждающей способности растительных масел и жиров кратко следует остановиться, так как они длительное время широко использовались при закалке и, кроме того, в настоящее время применяются в качестве обязательной добавки к некоторым сортам минеральных масел.

Кривые, характеризующие охлаждающую способность некоторых растительных масел, приведены на фиг. 34. Здесь же для сравнения приведены аналогичные данные для масла индустриального 20 (веретенного 3). Обращает на себя внимание наличие у большинства растительных масел более высоких скоростей охлаждения при высоких температурах, что может быть объяснено более интенсивным их разложением и повышенной скоростью конденсации паров. При низких температурах, определяющих закаливательную способность, растительные масла охлаждают практически так же, как и минеральные масла нормальной вязкости. Исключение представляет масло ваточника, обладающее повышенной охлаждающей способностью при температуре ниже 350° .

27. ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ МАСЕЛ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ

Основные физико-химические и эксплуатационные характеристики масел — охлаждающая способность, температура вспышки, вязкость, удельный вес и наличие осадков — в процессе работы изменяются; при длительной работе масло становится совершенно непригодным для закалки и его приходится заменять.

Изменение свойств закалочных масел обуславливается главным образом процессами окисления, происходящими практически при любых и особенно при высоких температурах, а также процессами термического распада и окислительного крекинга, происходящими только выше температур $275—300^\circ$.

Процессы окисления при работе закалочных масел ускоряются каталитическим действием металлических окислов, всегда имеющих на металлической поверхности, а также водой, присутствующей в масле. Вода резко повышает активность имеющихся в масле кислот, в результате чего образуются мыла, в свою очередь способствующие дальнейшему окислению масла. Это окисление происходит тем быстрее, чем выше средняя температура масла. Пере-

шивание масла воздухом ускоряет процесс окисления. В результате процессов окисления масла его вязкость и температура вспышки возрастают.

Вместе с тем, вследствие контакта масла с раскаленной металлической поверхностью отдельные его объемы разогреваются до температур, превышающих 275—300°, и подвергаются термическому разложению, состоящему в том, что тяжелые углеводороды разлагаются на легкие углеводороды, обладающие низкой температурой кипения и снижающие температуру вспышки закалочного масла. Отсюда следует, что процессы окисления и термического разложения по-разному влияют на температуру вспышки закалочного масла. Первые обуславливают ее повышение, вторые — снижение. Если средняя температура всей массы масла в баке в процессе работы удерживается на низком уровне и в нем производится закалка толстых изделий при слабой циркуляции масла, то процессы термического разложения масла при этом превалируют над процессами окисления, что обуславливает образование значительного количества низкокипящих фракций и снижение температуры вспышки. Наоборот, при высокой средней температуре масла в баке, интенсивном его перемешивании воздухом, закалке тонких изделий и продолжительной работе масла процессы окисления приобретают доминирующее значение, что обуславливает сохранение или даже повышение температуры вспышки масла. В результате глубоких изменений в масле образуются кислые и нейтральные продукты реакций, часть из которых растворяется в масле, а нерастворимая часть образует осадок. При этом масло теряет свою прозрачность, загустевает и становится мылким на ощупь. В таком остаревшем масле изменяются все физико-химические свойства и в том числе охлаждающая способность.

Склонность различных масел к изменению их свойств в процессе работы, к сожалению, не может быть заранее предопределена на основании обычных физико-химических характеристик — вязкости, удельного веса, температуры вспышки и пр. Эта склонность масел в условиях их работы как закалочных сред еще требует экспериментальной проверки [12].

Изменение охлаждающей способности масла индустриального 20 в результате многократных закалок показано на фиг. 35. Как видно из представленных кривых¹, в результате старения закалочного масла сильнее всего снижаются скорости охлаждения в наиболее важной, нижней области температур 450—200°. После закалки изделий, вес которых был равен десятикратному весу масла, снижение скоростей охлаждения в интервале 400—200° составило 6—65 град/сек.

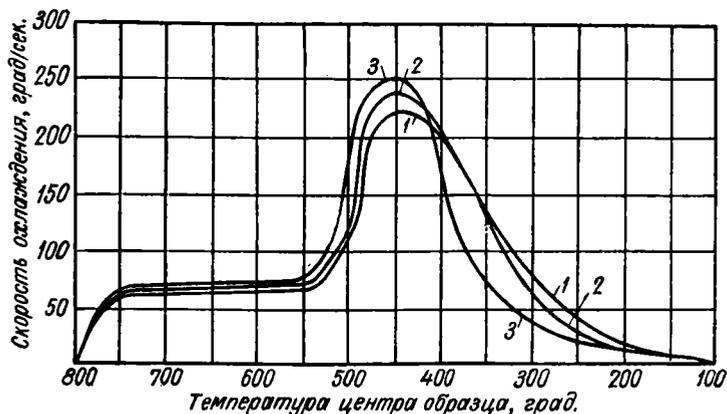
Изменение охлаждающей способности масла вызывает и заметное снижение его закалывающей способности.

В некоторых отраслях промышленности уже разработаны предельные эксплуатационные нормы физико-химических характери-

¹ Кривые получены совместно с А. Н. Хазаном.

стик масел, устанавливающие его непригодность для дальнейшей работы.

Потеря минимально необходимых эксплуатационных характеристик закалочных масел часто определяется по повышению вязкости, а также по продолжительности работы масла. Так, повышение вязкости закалочного масла в процессе работы на 30—40% считают признаком того, что оно сработалось и к дальнейшей эксплуатации непригодно. Чаще таким критерием сработанности масла является получение на закаливаемых изделиях пониженной или неоднородной твердости.



Фиг. 35. Изменение охлаждающей способности масла индустриального 20 (веретенного 3) при 50° в результате старения:

1 — индустриальное 20 (веретенное 3) свежее; 2 — то же после закалки изделий весом 5Q; 3 — то же после закалки изделий весом 10Q (Q — вес масла). Образец серебряный, сферический, \varnothing 20 мм. Скорость перемещения образца 25 см/сек.

В связи с тем, что вязкость масла недостаточно точно характеризует его охлаждающую способность, контроль сработанности закалочных масел целесообразно производить по его охлаждающей или закалывающей способности. Для этого из работающего бака должны систематически отбираться пробы масла для контроля охлаждающей способности в лаборатории. Там, где это сделать невозможно, целесообразно в лабораторных условиях контролировать степень сработанности масла закалкой стандартных образцов; марка стали и размер образцов должны быть заранее тщательно подобраны. Аналогичный контроль целесообразно осуществлять также и при частичном пополнении или полной замене масла в закалочных баках.

28. РЕГЕНЕРАЦИЯ МАСЕЛ

Остаренное или сработанное закалочное масло, в силу окисления и термического разложения частично потерявшее свою охлаждающую способность, должно подвергаться регенерации.

Если смазочные масла в процессе регенерации часто подвергаются только очистке от механических примесей, то регенерация закалочных масел всегда преследует более широкие задачи: во-первых, восстановление их охлаждающей способности и, во-вторых, очистку от шлама, смолы и коллоиднорастворенных частиц, а также других продуктов химических превращений.

Восстановление охлаждающей способности масел обычно достигается частичной заменой остаренного масла свежим. При этом количество добавляемого масла часто определяется размером естественной убыли его в процессе работы. Регенерацию охлаждающей способности масла за счет частичного введения свежего масла следует производить после предварительного приготовления в лаборатории пробных смесей остаренного и свежего масла с контролем охлаждающей и закаливающей способности смеси.

Следует, однако, иметь в виду, что наличие в масле продуктов окисления и термического разложения является вредным не только потому, что это обуславливает образование осадков и повышение вязкости, но и потому, что продукты превращений своим присутствием вызывают снижение охлаждающей способности и, кроме того, резко ускоряют его старение.

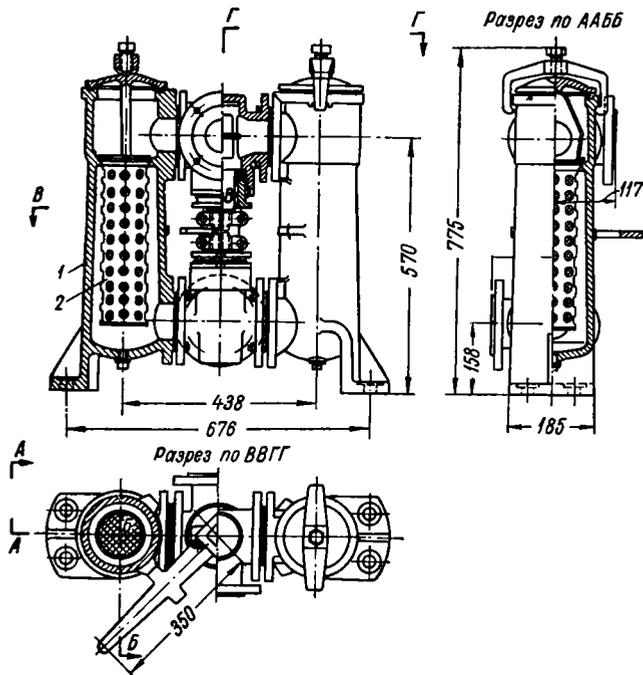
Поэтому регенерацию остаренного масла добавками свежего следует производить только после предварительной тщательной его очистки от осадков, растворенных примесей и удаления влаги.

К числу простых способов очистки масел относятся отстой, сепарация, фильтрование, промывка и очистка коагуляцией.

Отстой масел с целью удаления воды, нерастворимых и труднорастворимых частиц в отстойниках возможно большего поперечного сечения длится до 18 час., после предварительного подогрева очищаемого масла до 80—90°. Разновидностью этого метода, получившей более широкое распространение, является очистка масла, подогретого до 60—65°, от воды и механических примесей на центробежных аппаратах, имеющих барабаны, вращающиеся со скоростью до 40 000 оборотов в минуту. Фильтрование заключается в пропускании или продавливании очищенного масла через различные фильтрующие материалы: волокнистый асбест, ткани, бумагу, войлок, песок, металлические сетки, металлические пластинчатые фильтры и др.

Высота фильтрующего слоя играет большую роль и обычно устанавливается в зависимости от материала. Например, для асбеста, при фильтровании через него масла, нагретого до 80°, оптимальной оказалась высота 20 мм. Для более быстрого проталкивания масла через фильтр используют давление столба масла высотой в несколько метров, вакуум за фильтром, избыточное давление перед фильтром или насосы, а также сжатый воздух. Естественно, что более плотные фильтрующие материалы, при прочих равных условиях, требуют для повышения скорости фильтрации большего давления. Однако излишне высокое давление нежелательно при фильтровании, так как оно обуславливает прохождение через фильтр значительного количества примесей. Фильтрова-

ние горячего масла, имеющее место на практике, способствует ускорению процесса. Присутствие большого количества примесей в состоянии, близком к коллоидальному, при котором они не задерживаются и проходят через фильтры, а также при наличии веществ, заклеивающих фильтр, в фильтруемое масла вводится «вспомогательный порошок» — кизельгур, инфузорная или фулле-



Фиг. 36. Фильтр для масла.

рова зѣмли, а также отбеливающие зѣмли (гумбрин, зикеевская и др.). В тех случаях, когда фильтры работают непосредственно в циркуляционной системе, в фильтруемые масла в целях ускорения процесса фильтрования вводятся так называемые моющие присадки, предотвращающие оседание твердых сажистых веществ и ускоряющие процесс фильтрования. Фильтрование производится с помощью сдвоенных фильтров. Наиболее распространенная конструкция сдвоенного фильтра приведена на фиг. 36. В чугунный корпус 1 вставлен и плотно прижат к корпусу винтом каркас 2, с фильтровальной латунной сеткой. Фильтруемое масло проходит фильтр сверху вниз. При этом имеющиеся в фильтре загрязнения задерживаются в сетке, которая для их удаления может периодически извлекаться из фильтра. Сдвоенный фильтр обычно устанавливается в маслоохладительных системах, и масло прогоняется через него насосом. Масло направляется в один из фильтров; другой в это время может подвергаться очистке от осадка.

В некоторых случаях, при необходимости отделения продуктов окисления, а также смолистых веществ, образующих с маслом коллоидный раствор, целесообразно применять коагуляцию примесями такими веществами, как жидкое стекло, фосфат натрия, хлористый цинк и др. Так, очистка жидким стеклом производится с предварительным нагревом масла до 70—80° с последующей добавкой от 2 до 6% жидкого стекла при интенсивном перемешивании масла, которое продолжается в течение примерно 15 мин. После отделения жидкого стекла отстаиванием или фильтрованием масло подвергается промывке. В результате такой очистки в масле резко снижается содержание механических примесей, золы, а также понижается кислотность. Более эффективными и в то же время более сложными способами очистки являются сернокислотный и щелочной [12]. Чаще же всего очистка остаренных закалочных масел ограничивается отстаиванием и фильтрованием.

Очистка закалочных масел более сложными способами требует применения оборудования и наличия квалифицированного персонала. Поэтому целесообразно организовать районные централизованные пункты по очистке масел и снабдить их всем необходимым для квалифицированного ведения процесса.

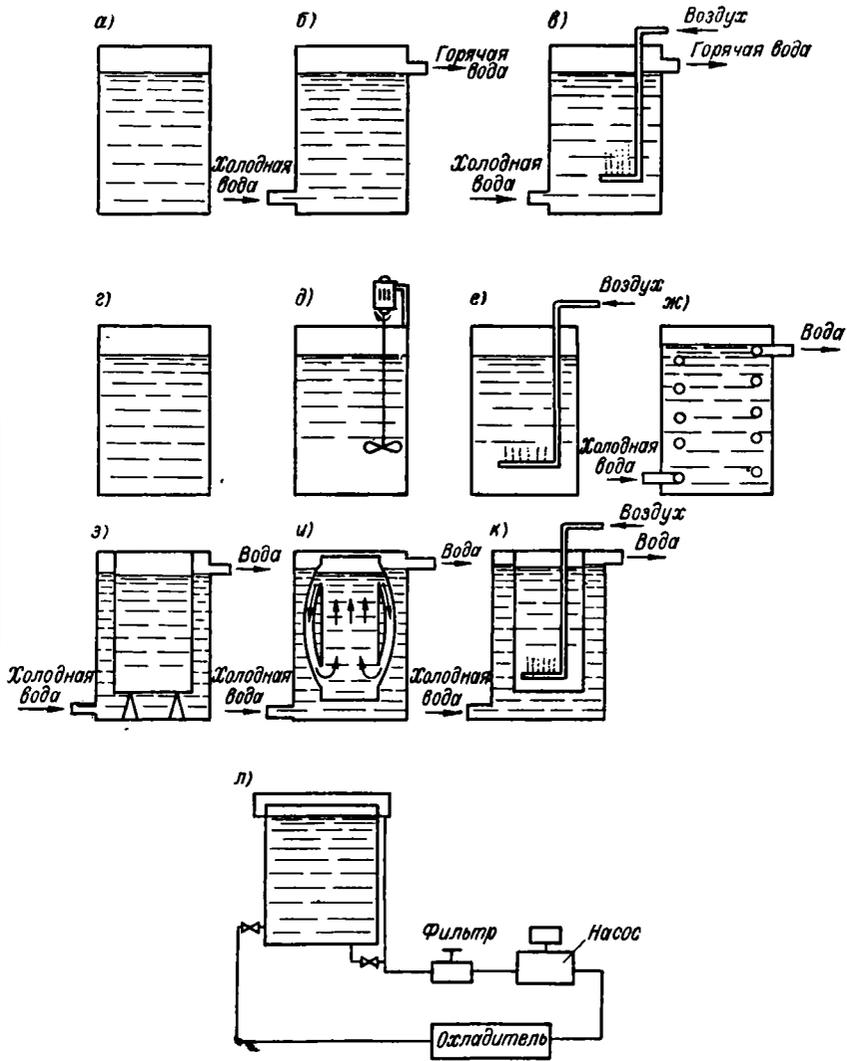
29. ЗАКАЛОЧНЫЕ БАКИ И ОХЛАДИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Закалочные баки бывают самых различных размеров, емкостью от десятков литров до сотен куб. метров. Изготавливаются из листовой стали толщиной от 1,5 до 15 мм. Форма баков бывает различной. Баки небольшой емкости изготавливаются стационарными или передвижными на тележках. Баки большой емкости опускают ниже уровня пола так, что над полом они выступают на 0,7—1,0 м. В целях удаления дыма и газов у масляных баков применяются бортовые отсосы, обеспечивающие среднюю скорость отсоса в рабочем пространстве 1,5 м/сек. В некоторых случаях, в целях предупреждения загорания масла, баки, кроме того, оборудуются баллонами с углекислотой, которая в случае необходимости подается на поверхность масла.

Закалочные баки часто оборудуются подъемными устройствами для погружения и извлечения из них закаливаемых изделий.

В настоящее время значительное распространение получают конвейерные закалочные баки, в которых процессы закалки, а также очистка баков целиком механизированы.

Объем закалочных баков для воды, водных закалочных растворов, а также масел чаще всего рассчитывается с значительным запасом, так, чтобы после охлаждения в них очередных садок изделий средняя температура жидкости не поднималась более чем на 20—25°. За время в промежутках между закалками отдельных садок температура жидкости дополнительно снижается. Между объемом жидкости в баке и интенсивностью ее охлаждения, с одной стороны, и теплосодержанием изделий, охлаждаемых в закалочной жидкости в определенный промежуток времени, с другой стороны,

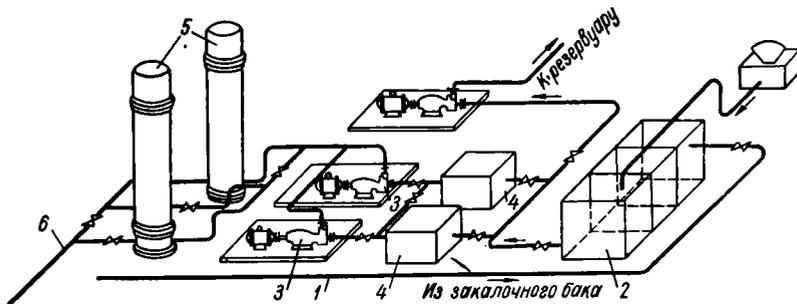


Фиг. 37. Способы охлаждения закалочных жидкостей.

должно всегда соблюдаться определенное соответствие. Охлаждение закалочных жидкостей в баках производится различными способами, часть из которых схематически представлена на фиг. 37, а—в.

Охлаждение воды производится (фиг. 37, а—в):

- 1) отводом тепла в воздух;
- 2) непрерывном подводе холодной и удалением подогретой воды;
- 3) так же, как и в предыдущем случае, с дополнительным перемешиванием воды воздухом.



Фиг. 38. Централизованная установка для охлаждения закалочного масла:

1 — трубопровод; 2 — емкость с тремя секциями; 3 — насосы; 4 — фильтры; 5 — маслоохладители; 6 — подача масла в закалочные баки (схема).

При невысоких тепловых нагрузках на бак охлаждение закалочных масел производится теплоотводом в атмосферу без перемешивания или с перемешиванием воздухом или крыльчаткой (фиг. 37, г—е). В баках со значительной тепловой нагрузкой масло охлаждается внутренними змеевиками, по которым прогоняется холодная вода (фиг. 37, ж). В целях охлаждения масла баки делаются с двойными стенками, между которыми пропускается проточная вода. При этом часто масло перемешивают воздухом (фиг. 37, з, к). Видоизменением этого варианта является бак с отводными трубами, охлаждаемыми водой (фиг. 37, л). Наиболее эффективным способом охлаждения закалочного масла в баках большой емкости является использование специальных охлаждающих устройств (фиг. 37, л).

Охладители имеют несколько конструктивных вариантов. Менее распространенный вариант состоит в том, что две трубы с зазором между ними вставляются одна в другую. По внутренней трубе пропускается проточная вода, а навстречу ей, между трубами, — масло. Наиболее часто применяются охладители барабанного типа, представляющие собой стальной цилиндрический резервуар. Внутри резервуара установлено большое количество стальных или латунных труб малого диаметра, по которым прогоняется холодная вода. Через межтрубное пространство протекает охлаждаемая

жидкость. Обычно в таких холодильниках в целях более интенсивного теплообмена предусматривается проход жидкости противотоком или перекрестным потоком. Чаще всего в термических цехах устанавливаются охлаждающие системы, рассчитанные на централизованное охлаждение масла во всех закалочных баках цеха. Схема такой системы дана на фиг. 38 [8].

Горячее масло из баков поступает по трубе 1 в масляную емкость 2, обычно размещаемую в подвале и имеющую три отсека. Масло из одного отсека после отстоя перекачивается насосами 3 через фильтры 4 и охладители 5 по трубе 6 в закалочные баки. По выходе из охладителя температура масла снижается на 10—15°. Масло в двух других отсеках в это время подвергается отстоя и очистке. Общая емкость всех трех отсеков системы должна быть на 30—40% больше объема всего масла, находящегося в системе и баках, но не более 400 м³. Ежечасно маслоохладители в зависимости от их мощности пропускают от 10 до 100 м³ масла.

Большинство из описанных приемов охлаждения закалочных масел применимо и для охлаждения водных растворов солей и щелочей.

ГЛАВА V

ОХЛАЖДЕНИЕ В РАСПЛАВАХ МЕТАЛЛОВ СОЛЕЙ И ЩЕЛОЧЕЙ

В последние десятилетия много работ советских и зарубежных ученых было посвящено изучению изотермической и ступенчатой закалки изделий небольшой толщины. Было установлено, что при этих способах закалки полностью устраняется образование закалочных трещин, а коробление и внутренние напряжения получаются минимальными. Вместе с тем было показано, что чаще всего закалка в горячих средах обеспечивает получение более высоких, чем при обычной закалке, механических свойств. При одинаковой прочности, пластичность и вязкость получаются повышенными, обеспечивается более высокое сопротивление отрыву, пониженная чувствительность к надрезам и перекосам и повышенный предел выносливости.

Наряду с горячим маслом для закалки используются расплавленные металлы, а также расплавленные селитры и щелочи.

До недавнего времени считалось, что расплавленные металлы и, в частности, расплавленный свинец, в силу присущей им высокой теплопроводности, являются единственно пригодными и совершенно незаменимыми средами при выполнении патентирования. В результате специально проведенных экспериментов, однако, было установлено, что вместо расплавленных металлов, таких, как свинец, в ряде случаев патентирования могут быть использованы расплавы солей. Замена свинца солями при патентировании была осуществлена, например, на заводе Красная Этна в Горьком.

Большим вкладом в практику закалки в горячих средах явилось предложение С. С. Волкова и В. Е. Садовского [5] использовать расплавленные щелочи для светлой изотермической закалки. Быстрое распространение всех видов обработки в горячих средах обусловило разработку более совершенных конструкций электродных ванн с обеспечением в них циркуляции солей. Усовершенствование процессов закалки в горячих средах и разработка более совершенного закалочного оборудования позволили применить на многих заводах автоматизацию процессов термической обработки, резко повысить производительность и качество изделий при одновременном резком снижении их брака.

30. ОХЛАЖДЕНИЕ В ЖИДКИХ МЕТАЛЛАХ

Далеко не все низкоплавкие металлы, даже при наличии у них значительной теплопроводности и теплоемкости, могут быть использованы для закалки стали. Некоторые из них, такие, как кадмий, висмут и ртуть, являются слишком дорогими и дефицитными, а пары ртути, кроме того, являются еще и очень ядовитыми. Магний и цинк обладают повышенной окисляемостью. Алюминий сильно разъедает стальные изделия. Поэтому из числа металлов в практике термической обработки значительное распространение получил один только свинец. Значительно реже применяется олово, а также сплавы его со свинцом и цинком (табл. 10). Несмотря на

Таблица 10

Состав и свойства металлических ванн, применяемых для закалки [16]

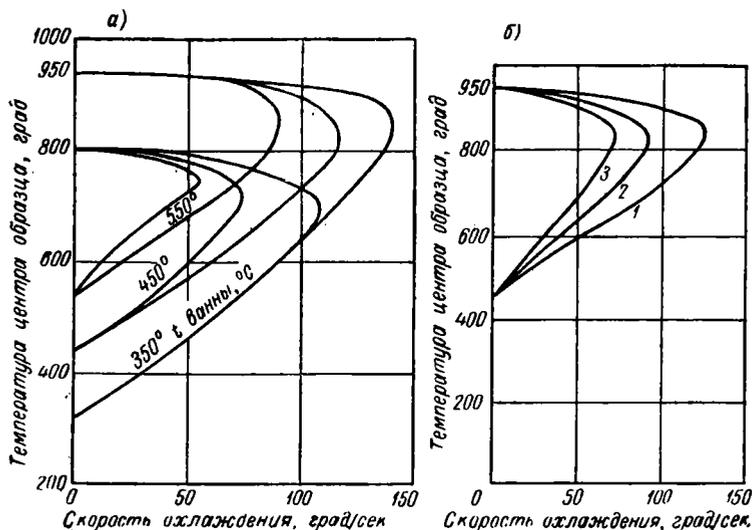
| Состав в % | Температура плавления в град. | Температура кипения в град. | Теплопроводность в ккал/м час град | Теплоемкость в ккал/кг град. | Рабочая температура в град. | Жидкотекучесть — пуаз |
|-------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Pb | 327 | 1744 | 31 | 0,032 | 330—930 | 58,8 |
| Sn | 232 | 2270 | 29,3 | 0,061 | 240—1000 | — |
| 63 Sn + 37 Pb | 183 | | | | 190—350 | — |
| '91 Sn + 9 Zn | 200 | | | | 210—400 | — |
| 32,5 Sn + 67,5 Pb | 225 | | | | 240—400 | |
| 15 Sn + 85 Pb | 280 | | | | 300—500 | |

низкую температуру плавления многих металлов, температура кипения их, как видно из табл. 10, высока, вследствие чего охлаждение в них не сопровождается кипением и характер его, как видно из фиг. 1, принципиально отличается от характера охлаждения в масле. Охлаждение при высоких температурах идет быстрее в металле, при средних и низких — в масле.

Приближенно можно считать, что максимальная скорость охлаждения в масле такая же, как и в свинце, нагретом до 350°. Скорость охлаждения в расплавленных металлах зависит от разности температур охлаждаемого изделия и расплавленного металла, а также от интенсивности циркуляции расплава. Влияние температуры свинцовой ванны на скорость охлаждения в ней видно на фиг. 39. Снижение температуры ванны, так же как и повышение температуры нагрева образца, вызывает возрастание значений максимумов кривых. В то же время температура нагрева изделий небольшой толщины слабо влияет на скорость охлаждения при низких температурах, причем это влияние тем меньше, чем ниже температура ванны.

Очевидно, это влияние будет уменьшаться и при дальнейшем снижении толщины и тепловой инерции образца. Влияние циркуляции на скорость охлаждения показано на фиг. 39 [37]. В производственных условиях перемешивание расплавленного свинца вследствие его высокого удельного веса затруднительно. Поэтому изменение охлаждающей способности расплава свинца чаще достигается изменением его температуры.

Свинцовые ванны обычно представляют собой тигельные печи, отапливаемые мазутом или газом или обогреваемые электрическим



Фиг. 39. Зависимость охлаждающей способности свинцовой ванны от температуры нагрева (а) и скорости перемещения (б) 12-миллиметрового стального шарика. Температуры нагрева ванны 550, 450 и 350°. Скорость перемещения образца: 1 — 30 см/сек; 2 — 10 см/сек и 3 — образец неподвижен. Нагрев образца — 800 и 950°.

током с помощью нагревательных элементов, расположенных снаружи тигля. В целях предохранения от окисления зеркало свинцовой ванны покрывается древесным углем, а образующиеся окислы периодически собираются и удаляются с поверхности ванны. Существенным недостатком свинцовых ванн является также выделение вредных паров. Поэтому свинцовые ванны обязательно должны снабжаться вытяжными зонтами.

Как указано выше, работами, выполненными в последние годы, подтверждена возможность замены в закалочных ваннах свинца солями и щелочами. При этом выявился целый ряд преимуществ, связанных с этой заменой, заключающихся в следующем:

1) соляные ванны позволяют применить внутренний электрический нагрев, что резко повышает их коэффициент полезного действия, облегчает автоматизацию регулирования температурного режима и способствует лучшему перемешиванию ванны;

- 2) соли легко отмываются от изделий, поэтому нет необходимости применять специальные меры по предохранению от налипания;
- 3) соли значительно дешевле и менее дефицитны, чем многие низкоплавкие металлы;
- 4) применение расплавленных щелочей позволяет получать совершенно чистую металлическую поверхность без наличия окислов и окалины.

В связи с этим в настоящее время расплавленные металлы в закалочных ваннах успешно заменяются солями и щелочами.

31. ОХЛАЖДЕНИЕ В СОЛЯХ И ЩЕЛОЧАХ

Так как соли и щелочи при закалке в них изделий не кипят, то процесс охлаждения в них принципиально не отличается от охлаждения в металлах. Правда, селитры при охлаждении в них раскаленных изделий перегреваются, и это приводит к частичной их диссоциации, сопровождающейся тепловым эффектом. Однако вследствие небольшой величины последнего на характер процесса охлаждения в селитрах это заметного влияния не оказывает. Охлаждение изделий вызывает кипение воды, находящейся в соли, и это существенно изменяет скорости охлаждения. Однако и при этом сам характер охлаждения остается без существенных изменений.

Для заполнения охлаждающих ванн при закалках чаще всего используются четыре соли и две щелочи, некоторые физические характеристики которых приведены в табл. 11.

Кроме того, в последнее время опробованы естественные минералы: карналлит и сильвинит (соответственно по ТУ МХП 762—42 и ТУ МХП 1814—48), применение которых выгодно вследствие их низкой стоимости. В качестве добавок в закалочные ванны применяются также сода, поваренная соль и фосфорнокислый натрий. Перечень солей и щелочей, а также смесей, уже применяемых или внедряемых в производство, приведен в табл. 12.

Зависимость охлаждающей способности солей и щелочей от их физико-химических свойств систематически изучалась только в последнее время, и поэтому здесь наряду с общепризнанными фактами еще имеются противоречивые данные. Трудности заключаются, в частности, в недостаточности экспериментальных материалов, характеризующих физические свойства расплавленных солей, щелочей и металлов. Теплопроводность солей и щелочей очень низка и составляет приблизительно 1% от теплопроводности металлов.

Теплоемкость солей в несколько раз выше, чем у расплавленных металлов. И это, наряду с другими свойствами, в значительной степени компенсирует отмеченное различие в величинах теплопроводности. Такая компенсация достигается только при условии обеспечения очень хороших условий для естественной и искусственной циркуляции ванн.

Физико-химические характеристики солей и щелочей,
используемых при закалке [16]

| Наименование | Химическая формула | Температура плавления в град. | Температура кипения (разложения) в град. | Жидкотекучесть пауз | Теплопроводность в ккал/м. час. град | Теплоемкость в ккал/кг. град | |
|-----------------------|---|-------------------------------|--|-----------------------------|---|---------------------------------|------|
| Нитрат натрия | NaNO_3 | 308 | Разлагается ниже температуры кипения | 66,7 | 0,30 | 0,42 | |
| Нитрат калия | KNO_3 | 334 | | 60,5 | | | 0,32 |
| Нитрит натрия | NaNO_2 | 284 | | — | | | — |
| Нитрит калия | KNO_2 | 387 | 1390 | — | — | — | |
| Едкий натр | NaOH | 328 | | 45,5 | | | 0,35 |
| Едкое кали | KOH | 360 | 1320 | 58,8 | | | |
| Сода | Na_2CO_3 | 851 | Разложение | | | | |
| Поваренная соль | NaCl | 800 | 1440 | — | | | |
| Фосфорнокислый натрий | $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ | 73 | < 200 | | | | |
| Карналлит | $\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 440 | | | | | |
| Сильвинит | $\text{KCl} \cdot \text{NaCl}$ | 750 | $\infty 1400$ | — | | | |

Теплоемкость твердых солей близка к теплоемкости жидких солей. Приближенные их значения могут быть найдены по правилу Дюлонга и Пти. Согласно правилу, молярные теплоемкости солей, образующих координационную решетку, могут быть получены умножением 6,2 (для твердых солей) или 7,25 (для жидких солей) на число атомов в молекуле. Так, для жидких NaOH и KOH удельные теплоемкости, рассчитанные согласно правилу Дюлонга и Пти, получаются равными соответственно 0,541 и 0,357 ккал/кг. град.

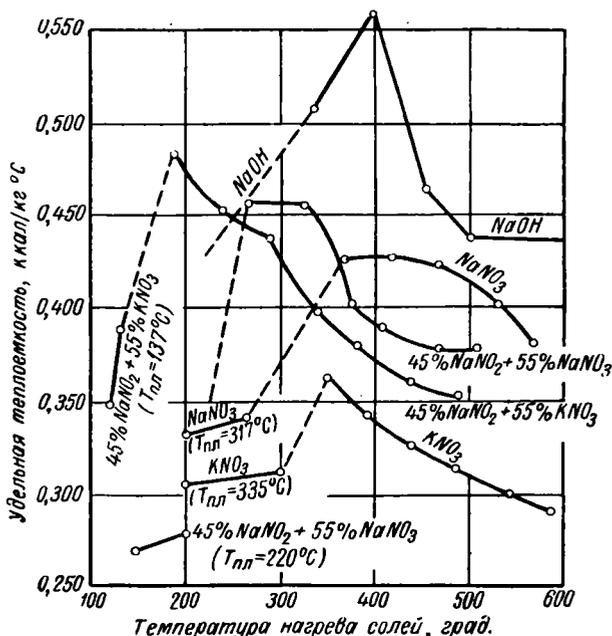
При перегреве расплавленных солей значительно выше температуры плавления их теплоемкость изменяется. На фиг. 40 представлены графики изменения теплоемкости чистых солей, а также их смесей, полученные на основе прямых опытов [16]. Как видно из приведенных кривых, с изменением температуры теплоемкость колеблется в значительных пределах, и это необходимо учитывать при выборе ванн с различными температурами. Еще больше на охлаждающую способность расплавленных солей влияют величина их жидкотекучести и температура нагрева, являющиеся взаимосвязанными. При повышении температуры ванны перепад температур между изделием и ванной снижается и охлаждение должно замедляться. В то же время повышение температуры расплавленных

Таблица 12

Состав соляных ванн, применяемых при закалке [28]

| Состав в % (весовых) | Температуры плавления в град. | Рабочая температура в град. |
|--|-------------------------------|-----------------------------|
| NaNO_3 | 308 | 320—550 |
| KNO_3 | 334 | 350—550 |
| NaNO_2 | 284 | 325—550 |
| KNO_2 . | 387 | — |
| $45\text{NaNO}_3 + 55\text{KNO}_3$ | 220 | 230—550 |
| $45\text{NaNO}_2 + 55\text{KNO}_3$ | 137 | 155—550 |
| $50\text{NaNO}_3 + 50\text{KNO}_2$ | 143 | 160—550 |
| $50\text{NaNO}_2 + 50\text{KNO}_3$ | 225 | 280—550 |
| $50\text{NaNO}_3 + 50\text{KNO}_3$ | 220 | 280—550 |
| $25\text{KNO}_3 + 75\text{NaNO}_3$ | 240 | 380—540 |
| $50\text{NaNO}_3 + 50\text{NaNO}_2$ | 205 | 260—600 |
| $25\text{NaNO}_2 + 25\text{NaNO}_3 + 50\text{KNO}_3$ | 175 | 205—600 |
| NaOH | 328 | 350—700 |
| KOH | 360 | 400—650 |
| $75\text{NaOH} + 25\text{NaNO}_3$ | 280 | 420—540 |
| $35\text{NaOH} + 65\text{KOH}$. | 155 | — |
| $20\text{NaOH} + 80\text{KOH}$ с добавкой $6\text{H}_2\text{O}$ | 130 | 150—250 |
| $37\text{NaOH} + 63\text{KOH}$ | 160 | 180—350 |
| $40\text{NaOH} + 35\text{Na}_2\text{CO}_3 + 25\text{KCl}$ (или NaCl) | | 500—600 |
| $60\text{NaOH} + 40\text{NaCl}$ | 450 | 500—700 |
| $45\text{NaNO}_3 + 27,5\text{NaNO}_2 + 27,5\text{KNO}_3$ | 120 | 240—260 |
| $53\text{KNO}_3 + 40\text{NaNO}_2 + 7\text{NaNO}_3$ с добавкой $2—3,5\text{H}_2\text{O}$ | 100 | 110—125 |
| $95\text{NaNO}_3 + 5\text{Na}_2\text{CO}_3$. | 304 | 380—520 |
| $38\text{KOH} + 22\text{NaOH} + 20\text{NaNO}_3 + 15\text{NaNO}_2 + 5\text{Na}_3\text{PO}_4$ | 150 | 160—360 |
| $70\text{NaOH} + 15\text{NaNO}_3 + 10\text{NaNO}_2 + 5\text{Na}_3\text{PO}_4$. | 250 | 280—600 |
| $60\text{NaOH} + 15\text{NaNO}_3 + 15\text{NaNO}_2 + 10\text{Na}_3\text{PO}_4$ | 280 | 300—500 |
| $40\text{NaOH} + 30\text{NaNO}_3 + 25\text{NaNO}_2 + 5\text{Na}_3\text{PO}_4$ | 280 | 300—500 |
| Карналлит | 440 | 450—600 |
| 93 Карналлита + 7NaCl | 410 | 450—600 |
| 93 Карналлита + 7 сильвинита | 390 | 450—600 |

солей приводит к резкому повышению жидкотекучести, и это должно ускорять охлаждение. Таким образом, оба эти фактора действуют всегда совместно в противоположных направлениях. Суммарный эффект этого действия, как это видно из графиков, приведенных на фиг. 41 [4], выявляется в виде максимумов значений коэффициентов теплоотдачи при перегреве солей в 150—200°. При меньших и больших перегревах значения коэффициентов теплоотдачи снижаются. Особенно велико это снижение при малых



Фиг. 40. Удельная теплоемкость солей и щелочей в зависимости от температуры нагрева.

перегревах, при которых жидкотекучесть расплавленных солей является еще совершенно неудовлетворительной.

Как известно, жидкотекучесть является величиной обратной вязкости. Вязкость солей зависит от их состава, степени перегрева выше температуры плавления, характера взаимодействия компонентов, наличия кристаллизационной воды и т. д. По данным Н. С. Курнакова и С. Ф. Жемчужного, вязкость расплавов двух солей при изменении их концентрации может изменяться по законам прямой, вогнутой или выгнутой линий в зависимости от характера взаимодействия компонентов в расплаве.

Зависимость значений жидкотекучести наиболее часто применяемых селитр и щелочей от температуры нагрева и температуры перегрева приведены в табл. 13. При температуре нагрева 400—450° высшую жидкотекучесть имеет NaNO₃, самую низкую — NaOH.

Различие в жидкотекучести разных солей значительно изменяется, если ее относить не к температурам нагрева, а к температурам перегрева их выше температуры плавления. В этом случае первое место по величине жидкотекучести займет КОН.

Жидкотекучесть селитр и щелочей, как это видно из приведенных данных, с увеличением температуры возрастает. Это же согласуется и с формулой Я. И. Френкеля, выражающей зависимость вязкости от температуры:

$$\eta = Ae^{\frac{\Delta U}{RT}},$$

где A и k — постоянные уравнения;

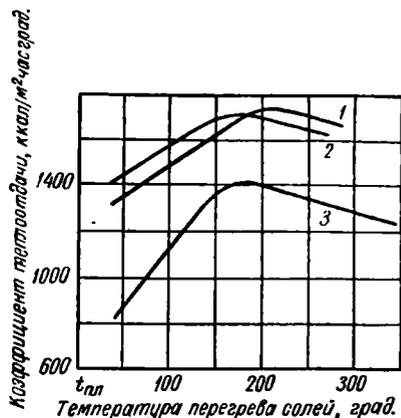
ΔU — энергия активации, необходимая для перемещения частиц жидкости из одного положения в соседнее;

e — основание логарифмов;

T — температура по абсолютной шкале.

Однако, как указывает А. И. Зотьев [16], жидкотекучесть зависит не только от температуры нагрева и степени перегрева соляной ванны, но и от состава солей ванны. Это положение А. И. Зотьев подтверждает данными табл. 14.

И. И. Сидорин [22], исследовавший охлаждающую способность сплавов систем $KNO_3 - NaNO_3$, $KNO_3 - NaNO_2$ и $KOH - NaOH$ нашел, что при одинаковых температурах все сплавы охлаждают



Фиг. 41. Зависимость коэффициентов теплоотдачи расплавленных солей от температуры их перегрева:

1 — $NaNO_3$; 2 — $NaNO_2$; 3 — смесь: 55% $KNO_3 + 45\% NaNO_3$ ($t_{пл}$ — температура плавления солей).

Таблица 13

Жидкотекучесть солей и щелочей при разных температурах и перегревах [16]

| $NaNO_3$ | | | KNO_3 | | | NaOH | | | KOH | | |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Температура нагрева в град. | Температура перегрева в град. | Жидкотекучесть — пауз | Температура нагрева в град. | Температура перегрева в град. | Жидкотекучесть — пауз | Температура нагрева в град. | Температура перегрева в град. | Жидкотекучесть — пауз | Температура нагрева в град. | Температура перегрева в град. | Жидкотекучесть — пауз |
| 402 | 94 | 53 | 390 | 56 | 45,5 | 400 | 72 | 34,5 | 400 | 40 | 43,5 |
| 458 | 150 | 65,8 | 408 | 74 | 49,6 | 450 | 122 | 45,5 | 450 | 90 | 58,8 |
| | | | 450 | 116 | 60,2 | 500 | 172 | 55,5 | 500 | 140 | 77,0 |
| | | | 491 | 157 | 70,5 | 550 | 222 | 66,5 | 550 | 190 | 100,0 |

Таблица 14

Зависимость условной жидкотекучести от состава и температуры ванны [16]

| Величина условной жидкотекучести $\frac{1}{\text{пуаз}}$ | Температура ванны в град. | Состав ванны |
|--|---------------------------|--|
| 50 | 425 | 80% NaNO_3 + 20% ($45\% \text{Na}_2\text{CO}_3$ + $35\% \text{NaCl}$ + $20\% \text{KCl}$) |
| 100 | 425 | 100% NaNO_3 |
| 150 | 425 | 75% NaNO_3 + 25% KNO_3 |
| 200 | 425 | 50% NaNO_3 + 50% KNO_3 |
| 250 | 425 | 50% KNO_3 + 50% NaNO_3 |
| 300 | 425 | 50% NaNO_3 + 50% KNO_3 |
| 50 | 525 | 90% NaNO_3 + 10% ($45\% \text{Na}_2\text{CO}_3$ + $35\% \text{NaCl}$ + $20\% \text{KCl}$) |
| 100 | 525 | 100% NaOH |
| 150 | 525 | 100% NaNO_3 |
| 200 | 525 | 75% NaNO_3 + 25% KNO_3 |
| 250 | 525 | 50% NaNO_3 + 50% KNO_3 |
| 300 | 525 | 75% NaNO_3 + 25% NaNO_2 |

Таблица 15

Относительная охлаждающая способность расплавов солей и щелочей [22]

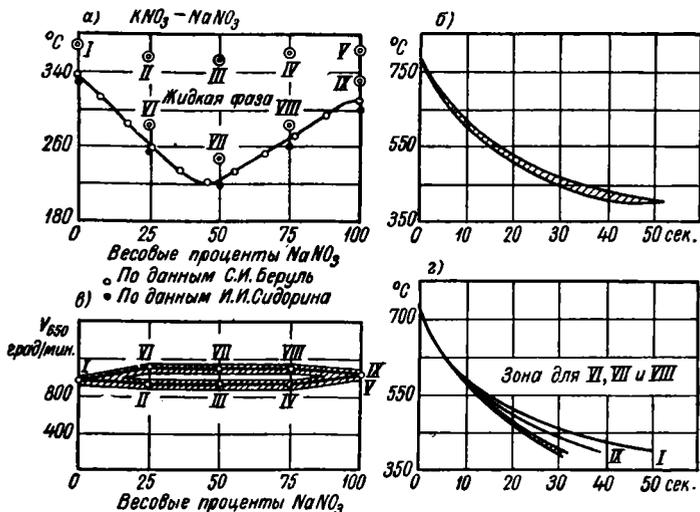
| Охлаждающая среда с циркуляцией | Относительная охлаждающая способность в интервале 650–550° |
|--|--|
| Вода при 20° | 1,000 |
| Сплав KNO_3 — NaNO_2 при 160° | 0,390 |
| То же при 200° или сплав NaOH — KOH при 200° | 0,365 |
| Сплавы KNO_3 — NaNO_2 , NaOH — KOH или KNO_3 — NaNO_3 при 250° | 0,334 |
| То же при 300° | 0,300 |
| 350° | 0,260 |
| 400° | 0,210 |

стальные изделия с одинаковой скоростью, которая может быть существенно повышена за счет снижения температуры расплавов. Сказанное подтверждается данными фиг. 42 и 43 [22], на которых представлена зависимость скоростей охлаждения расплавов от их температуры. На приведенных диаграммах (фиг. 42, а и 43, а)

состояния сплавов точками отмечены концентрации и температуры исследованных сплавов, а на графиках (фиг. 42, б, в, г, и 43, б, в, г) приведены данные по скорости охлаждения при 650° и сами кривые охлаждения. В этой же работе получена формула для определения относительной скорости охлаждения горячих сред при 650—500°:

$$v_{отн} = \frac{1258 - 0,135t - 0,00353t^2}{3000}.$$

При этом $v_{отн}$ для воды 20° принимается равной 1. Данные по относительной охлаждающей способности расплавов солей и щело-



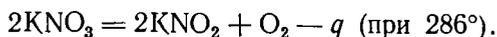
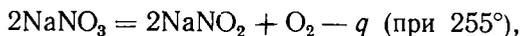
Фиг. 42. Охлаждающая способность системы KNO_3-NaNO_3 : а — линия ликвидуса I—IX — исследованные состояния системы; б — зона кривых охлаждения специального образца в средах при температуре ~360° (для I—V состояний системы); в — диаграмма скоростей охлаждения специального образца при 650° в средах с различными составами и температурами; г — кривые охлаждения специального образца в средах при температуре на 20—30° больше точки начала затвердевания.

чей [22] приведены в табл. 15. В исследовании И. И. Сидорина отмечается независимость охлаждающей способности соляной ванны от ее состава и температуры плавления входящих в нее солей. Охлаждающая способность ванны по И. И. Сидорину целиком определяется уровнем ее температуры и интенсивностью циркуляции.

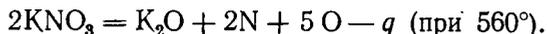
Это не согласуется с утверждением А. И. Зотьева о зависимости охлаждающей способности ванн от жидкотекучести, которая, в свою очередь, зависит как от температуры, так и от состава солей, входящих в ванну.

Влияние температуры на охлаждающую способность расплавов солей также видно из данных Люэга и Помпа, представленных на фиг. 44 [37].

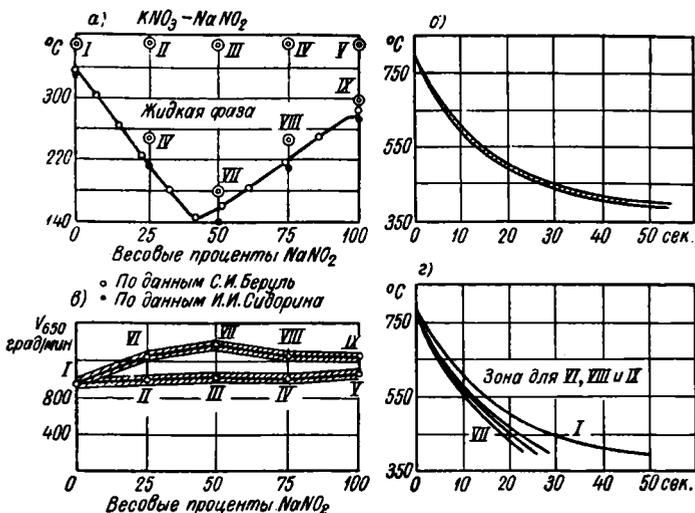
В процессе работы состав соляных ванн изменяется. Селитры при невысоких нагревах, как указывает А. И. Зотьев [16], постепенно разлагаются с выделением кислорода:



При значительных перегревах разложение идет более полно:



Частичная диссоциация нитратов с образованием нитритов приводит к снижению температуры плавления и повышению жидкотекучести.



Фиг. 43. Охлаждающая способность системы KNO_3 - NaNO_2 : а — линия ликвидуса; I—IX — исследованные состояния системы; б — зона кривых охлаждения специального образца в средах при температуре $\sim 360^\circ$ (для I—V состояний системы); в — диаграмма скоростей охлаждения специального образца при 650° в средах с различными составами и температурами; г — кривые охлаждения специального образца в средах при температуре на 20—30 $^\circ$ больше точки начала затвердевания.

кучести. Образующиеся тугоплавкие тяжелые окислы типа Na_2O оседают на дно ванны, удаляются с окалиной и существенного влияния на жидкотекучесть не оказывают.

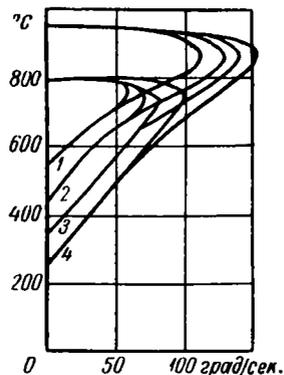
Таким образом, расплавленные селитры в процессе работы их в качестве закалочных сред изменяют свою охлаждающую способность только за счет выкипания воды. Расплавы селитр работают несколько лет без замены, но с обязательной периодической добавкой для компенсации естественного износа. Частичное изменение состава селитровых ванн может происходить за счет переноса солей из нагревательной ванны.

Образование в процессе работы селитровых ванн некоторых количеств атомарного азота обуславливает протекание в них процессов азотирования изделий. И. И. Косая [16] указывает, что азотирование протекает при повышенных температурах и достигает наибольшей скорости при 550—600°. В результате процессов азотирования низкоуглеродистой стали заметно повышаются ее твердость и прочность при одновременном снижении пластичности.

Расплавленные щелочи, в отличие от селитр, с течением времени изменяют жидкотекучесть и охлаждающую способность, что обусловлено растворением в них углекислоты воздуха, а также металлических окислов и хлоридов, которые вносятся с изделиями из нагревательных ванн. Эти примеси повышают температуру плавления сплавов. В течение семи дней работы ванна, состоящая из 30% NaOH и 70% KOH с добавкой 4% воды, при ежедневной закалке в ней 16—18 кг хромистой стали, за счет увеличения содержания углекислых солей существенно изменила свой состав и температуру плавления [7]. Закаливаемые изделия при этом нагревались в расплаве: 60% BaCl + 40% NaCl.

Жидкотекучесть загустевшей щелочной ванны может быть восстановлена добавками едкого кали или воды. В целях предотвращения загрязнения щелочных ванн солями нагревательной ванны нагрев изделий под закалку необходимо производить в смеси солей, обладающих возможно более высокой жидкотекучестью.

В некоторых случаях при выполнении светлой закалки в ваннах с температурой выше 500° вследствие повышенной жидкотекучести расплавленной щелочи и стекания ее с изделий не достигается предохранения их от окисления. В целях повышения защитных свойств в этом случае прибегают к снижению жидкотекучести добавками в щелочную ванну хлористых или углекислых солей калия и натрия. Недостаточное предохранение от окисления является также результатом наличия излишних количеств окислов в щелочи, что проявляется в виде образования тонких пленок на закаливаемых изделиях. При этом закаленные детали вместо серебристого приобретают ржавеватый цвет поверхности. В целях предотвращения этого щелочные ванны, работающие при температуре выше 500°, периодически (раз в несколько дней) раскисляются желтой кровяной солью $K_4Fe[CN]_6$, бурой или их смесью, которые вводятся в количестве нескольких сотых долей процента от веса щелочи в ванне. При работе с ваннами, имеющими температуру ниже 250°,



Фиг. 44. Изменение охлаждающей способности селитровой ванны (50% KNO_3 + 50% $NaNO_3$) от температуры нагрева ванны и образца.

Нагрев ванны: 1 — 550°; 2 — 450°; 3 — 350°; 4 — 250°.
Температура нагрева образца 800 и 950°.

добавки желтой кровяной соли являются малоэффективными и состояние поверхности детали в основном определяется нагревательной ванной. Предположительно при раскислении щелочных ванн при температуре выше 250° имеют место следующие реакции [16]:

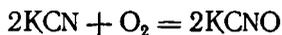
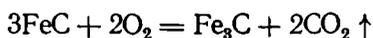
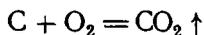
диссоциация соли



взаимодействие с NaOH



Продукты этой реакции взаимодействуют с кислородом воздуха:



Избыток $K_4Fe(CN)_6$ приводит к излишнему загрязнению ванн, и это при 300—400° вызывает образование на изделиях сажистого налета.

Хотя детали после светлой закалки в расплавленных щелочах получают свободными от окислов, однако в целях предохранения от коррозии в процессе дальнейшей обработки их после промывки приходится подвергать пассивированию, а после окончательного изготовления — оксидированию. И. Н. Богачевым и Р. И. Минцем [16] разработаны составы щелочных ванн (см. табл. 12) с добавками Na_3PO_4 , закалка и отпуск которых обеспечивают повышение антикоррозионной стойкости деталей. Использование таких ванн при термической обработке обеспечивает образование плотных и тонких оксидных пленок и освобождает от необходимости применения пескоструйной очистки, а также специальной операции оксидирования.

На охлаждающую способность селитр, а также щелочей сильно влияет циркуляция, которая позволяет значительно изменять скорость охлаждения, особенно изделий небольшой толщины в низкотемпературных ваннах. Сказанное подтверждается графиками на фиг. 45 [16]. При их построении использован стальной образец $\varnothing 6,5$ мм.

Циркуляция солей в ванне является неременным условием получения стабильных результатов закалки. Для обеспечения интенсивной циркуляции соляные ванны снабжаются специальными устройствами.

Очень сильное влияние на охлаждающую способность соляных ванн оказывают добавки воды. Последняя не только способствует повышению жидкотекучести солей, но и существенно повышает значение теплоты испарения смесей, обуславливающее значительное ускорение охлаждения в них.

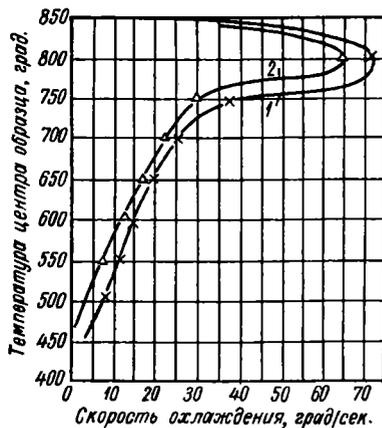
Введение воды резко изменяет температуру плавления как чистых селитр, так и их сплавов. Диаграмма ликвидус, системы $\text{KNO}_3\text{—NaNO}_3\text{—H}_2\text{O}$, построенная Н. В. Равичем и Ф. Б. Гинзбургом [21], в силу наличия двух модификаций KNO_3 состоит из четырех областей: KNO_3I , KNO_3II , NaNO_3 и льда. Изменение температуры плавления чистых селитр, а также их сплавов в результате добавок воды представлено графиками на фиг. 46 [21].

Влияние добавок воды на температуру плавления сплавов системы $\text{KOH—NaOH—H}_2\text{O}$, изучавшееся А. П. Гуляевым, Е. А. Лебедевой и В. В. Соколовской, приведено на фиг. 47 [7].

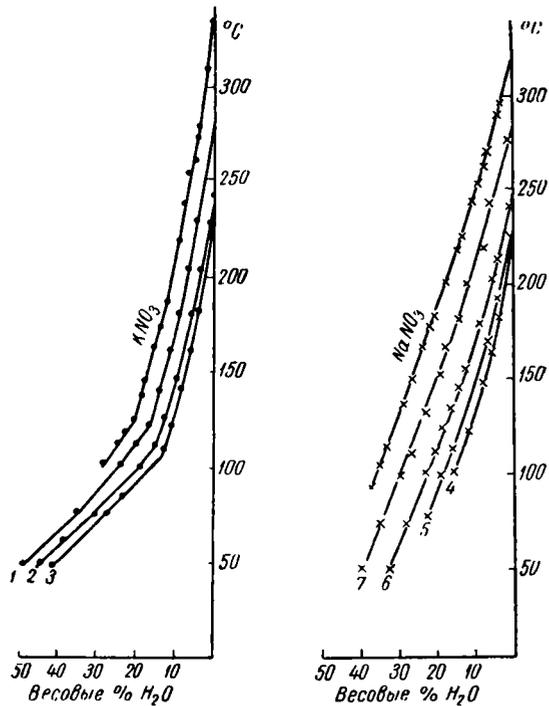
Введение небольших количеств воды в расплав, при содержании едкого натра ниже 35%, приводит к снижению температуры плавления; при более высоких содержаниях в расплаве едкого натра увеличение количества воды, наоборот, повышает температуру плавления. Так, при наличии в расплаве 37% едкого натра введение 6% воды приводит к повышению температуры плавления с 170 до 181°.

В работе [7] изучалось влияние воды на охлаждающую способность расплавленных солей. Полученные при этом данные представлены на фиг. 48. Из графиков видно, что вода наиболее сильно увеличивает охлаждающую способность холодных расплавов. Скорость охлаждения при этом возрастает непрерывно с повышением содержания воды. Влияние перемешивания щелочей и добавок воды представлено на фиг. 49 [22].

Обычно в расплавы соли вводится от 2 до 6% воды, а в расплавы щелочи — до 10—15%. Как указывает А. И. Зотьев [16], добавка воды наиболее целесообразна при температуре ванн, не превышающей 250°. При более высокой температуре происходит интенсивное испарение, вследствие чего введение, а также удержание в расплаве воды затруднительно. Даже при сравнительно низких температурах вода испаряется быстро, и поэтому приходится периодически вводить ее в соль для поддержания охлаждающей способности на приблизительно одинаковом уровне. Количество вводимой воды должно быть тем больше, чем выше температура ванны и больше вес закаливаемых изделий. Практика показывает, что лучшее усвоение воды достигается при введении ее в количестве 4% от веса соли после тщательного перемешивания с охлаждением до затвердевания и последующим расплавлением.

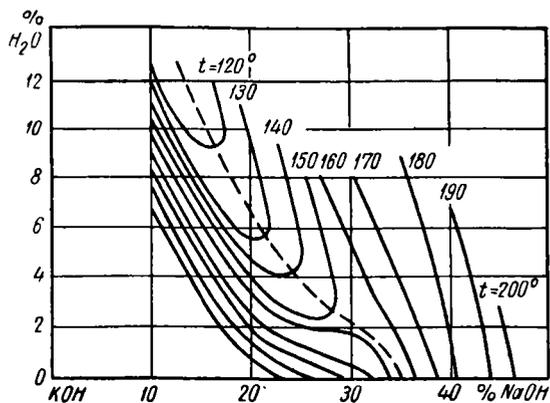


Фиг. 45. Влияние скорости перемещения образца на скорости охлаждения его в расплавленных солях: 1 — при перемещении с $v = 3$ м/мин; 2 — без перемещения.



Фиг. 46. Изменение температуры плавления селитр и их сплавов в результате добавки воды:

| % NaNO ₃ | % KNO ₃ | % NaNO ₃ | % KNO ₃ |
|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| 1 — 20 | 80 | 5 — 50 | 50 |
| 2 — 35 | 65 | 6 — 60 | 40 |
| 3 — 41,2 | 58,8 | 7 — 80 | 20 |
| 4 — 45,7 | 54,3 | | |



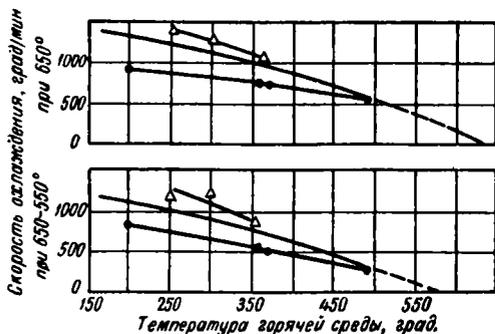
Фиг. 47. Кривые (изотермы) затвердевания сплавов с различным соотношением NaOH—KOH—H₂O.

Опытами установлено, что добавка воды в щелочи не только не ухудшает качества поверхности закаливаемых изделий, а, наоборот, ускоряя охлаждение, способствует получению более чистой поверхности.

Несмотря на высокую охлаждающую способность и возможность выполнения светлой закалки, соляные ванны с добавками воды обладают существенным недостатком, состоящим в пониженной их стабильности. Поддержание постоянного уровня охлаждающей способности ванны требует систематического контроля, который осуществляется либо определением электросопротивления стандартного столбика стоек, периодически отбираемых из ванны, либо анализом прокаливаемости стандартных образцов в ванне.

Контроль и поддержание определенного содержания воды в таких ваннах с целью стабилизации их охлаждающей способности желательно автоматизировать.

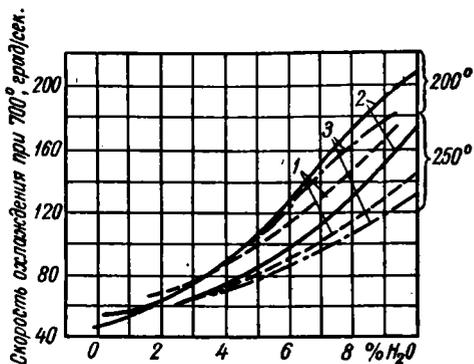
В этом случае соляные ванны с добавками воды будут обеспечивать значительно более устойчивые результаты закалки.



Фиг. 49. Влияние перемешивания щелочей и добавок воды на охлаждающую способность горячих сред:

—●— неперемешиваемая среда;
 —■— перемешиваемая среда;
 - - - Δ - - - перемешиваемая кипящая среда (35% КОН + 65% NaOH + H₂O).

Тигли обычно изготовляются из низкоуглеродистой стали марки 08 или Ст. 2, а также из чугуна. Стойкость последних, по данным заводов, значительно превышает стойкость



Фиг. 48. Закаливающая способность (скорость охлаждения поверхности стальной цилиндрического образца диаметром 25 мм при 700°) расплава едких щелочей в зависимости от содержания в них воды: 1 — 20% NaOH + 80% КОН; 2 — 30% NaOH + 70% КОН; 3 — 40% NaOH + 60% КОН.

Температура закалочной среды 200 и 250°.

32. СОЛЯНЫЕ ВАННЫ

Соляные ванны изготовляются как с тиглями, так и без них. Применение тигельных печей часто обуславливается необходимостью отапливания ванн мазутом или газом.

Тигли обычно изготовляются из низкоуглеродистой

стальных тиглей. Последние, в свою очередь, могут изготавливаться отливкой и сваркой, причем более высокой стойкостью обладают литые тигли. Сварные тигли обычно прогорают по месту сварки. Так как соли отличаются пониженной по сравнению с металлами теплопроводностью, то особое значение приобретает равномерность обогрева тиглей и циркуляция солей, снижающие опасность местных перегревов и прогорания тиглей. Во избежание этого и сами топки необходимо конструировать так, чтобы они по возможности исключали такие перегревы. Для этого форсунки и горелки располагают в форкамерах, а также применяют футерование снаружи наиболее сильно обогреваемых частей тигля и т. д. Перегрев селитр выше температуры их плавления вообще не должен превышать 250°, а щелочей — 400—500°. Сильные перегревы ванн особенно нежелательны, если они заполнены селитрами, так как при наличии древесного угля, дерева, сажи цианистых солей, масла и некоторых других веществ возможно не только их воспламенение, но и взрыв.

При конструировании отопляемых ванн на случай их прогорания должен быть предусмотрен безопасный аварийный сток селитры в отдельный приямок, обязательно изолированный от топки и дымохода. Отопляемые соляные печи-ванны отличаются рядом недостатков: низким коэффициентом полезного действия, трудностью осуществления автоматической регулировки температур, отсутствием электромагнитного перемешивания, повышенной пожарной опасностью и пониженной стойкостью тиглей. В связи с этим отопляемые соляные ванны используются преимущественно на заводах, на которых ощущается недостаток электроэнергии. Лучшим вариантом отопляемых ванн являются ванны с излучающими трубами и вынесенной топкой. Наибольшее распространение на заводах, располагающих достаточным количеством электроэнергии, получили ванны, обогреваемые с помощью электрического тока. Такие ванны имеют более высокий коэффициент полезного действия и отличаются рядом эксплуатационных преимуществ. Температура в них легко поддается точной автоматической регулировке. Обогрев осуществляется нагревательными элементами, либо расположенными снаружи тиглей, либо помещенными в трубы, которые погружены в расплавленную соль. Лучшим и наиболее распространенным вариантом является нагрев током, проходящим непосредственно через расплавленные соли в ванне между специальными погруженными или утопленными электродами. Так как расплавленная соль является проводником с высоким электросопротивлением, то при прохождении через нее тока выделяется значительное количество тепла, позволяющее разогревать соли и поддерживать в них требуемую температуру. Образующееся при этом электромагнитное поле обеспечивает, кроме того, интенсивную циркуляцию солей в ванне, благодаря чему достигается равномерный их разогрев, исключаются местные перегревы и, главное, резко возрастает охлаждающая способность солей. Поэтому такие ванны являются и наименее опасными в пожарном отношении. Срок

службы электродных тигельных ванн значительно больше, чем отапливаемых. Для перемешивания солей в электрических ваннах и, особенно, в ваннах отапливаемых используют различные способы: воздушное перемешивание, перемешивание крыльчаткой, вращаемой электромотором, перекачивание соли насосом и пр. Первый из указанных способов наиболее прост, однако он вызывает охлаждение солей. Перекачивание требует специальных насосов. Поэтому наиболее приемлемым является второй способ перемешивания солей специальной крыльчаткой. Этот способ приобретает первостепенное значение, например, при изотермической закалке доэвтектоидных углеродистых сталей. При патентировании проволоки в соляных ваннах без перемешивания в структуре стали наряду с сорбитом образуется значительное количество структурнообедненного феррита, снижающего механические свойства проволоки. Патентирование же проволоки в ваннах с интенсивной циркуляцией обеспечивает получение более мелкого сорбита без наличия феррита.

33. ЩЕЛОЧНЫЕ ВАННЫ

Для охлаждения закаливаемых изделий в расплавленных щелочах используются ванны со сварными или литыми тиглями круглой или эллиптической формы из низкоуглеродистой стали. Толщина стенок тигля 6—10 мм. Обогрев производится трубами электронагрева (ТЭН), внешними электрообогревателями, а также сжиганием жидкого или газообразного топлива. Для светлой изотермической и ступенчатой закалки в щелочах могут быть использованы, после соответствующей переделки, селитровые ванны ВЦ23. Размер тиглей и самих ванн определяется габаритными размерами закаливаемых изделий и размерами садок. Тигли выполняются с таким расчетом, чтобы в процессе охлаждения изделий температура щелочи поднималась не выше чем на 5°. В целях обеспечения удовлетворительного уровня охлаждающей способности и равномерности охлаждения расплавленные щелочи обязательно должны перемешиваться. Перемешивание щелочи сжатым воздухом не оправдало себя на практике, так как при этом не обеспечивается равномерность охлаждения и, кроме того, вследствие повышенной окисляемости среды необходимо производить дополнительное раскисление ванны. Обычно перемешивание производится крыльчаткой, вал которой в целях удобства работы смещается к стенке ванны.

Крыльчатка с помощью электромотора делает 800—1400 об/мин. Часть вала (передающего движение крыльчатке), расположенная у поверхности ванны, в целях предохранения от разбрызгивания щелочи защищается специальным кожухом. В целях очистки ванны от упавших деталей и осадка над дном ванны устанавливается ложное дно или для работы используется дырчатая корзина. Для удаления пара и газообразных продуктов ванны снабжаются зонтами или бортовыми отсосами. При массовом и крупносерийном

производстве процессы изотермической закалки в щелочах широко механизуются и автоматизируются. Автоматизация регулировки температур, загрузки, контроля продолжительности выдержки изделий в ваннах, а также переноса изделий из одних ванн в другие обеспечивает строгое выполнение заданного технологического процесса и гарантирует выпуск недорогой продукции высокого качества. Автоматические агрегаты, снабженные щелочными ваннами для светлой изотермической и ступенчатой закалки, имеются на инструментальных заводах, в частности, на заводе «Фрезер». Применение таких агрегатов с щелочными ваннами, например, для изотермической закалки метчиков позволило сократить производственный цикл обработки в 12 раз при снижении себестоимости на 48% и повышении производительности труда на 120%. Получаемые метчики вовсе не нуждаются в правке и химической обработке.

ГЛАВА VI

ОСОБЫЕ СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Чаще всего закалка изделий производится непрерывным охлаждением их с температуры нагрева до 80—20° в одной жидкой среде. Такое охлаждение изделий в умеренно охлаждающих средах: маслах, расплавленных солях и металлах — производится без применения каких-либо особых приемов, и обычно выполнение его трудностей не вызывает. Изделия после нагрева погружаются в спокойную или циркулирующую закалочную среду, охлаждение производится до температуры среды и затем на воздухе.

Значительно сложнее охлаждение в быстро охлаждающих средах: в воде и средах на водной основе. В этом случае в процессе охлаждения изделий средней и особенно большой толщины в них возникают перепады температур между поверхностью и центром, достигающие 600 и более градусов, вызывающие значительные напряжения, коробление и образование трещин.

В целях снижения уровня напряжений, возникающих при закалке, предпринимаются специальные меры. К числу их относится ограничение интервала быстрого охлаждения изделий при закалке, а также снижение самих скоростей охлаждения внутри этого интервала.

34. ОГРАНИЧЕНИЕ ИНТЕРВАЛА БЫСТРОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Для ограничения интервала быстрого охлаждения применяется подстуживание закаливаемых изделий на воздухе перед погружением в жидкость, а также извлечение изделий из закалочной среды до завершения процесса охлаждения. Оба эти мероприятия могут осуществляться совместно или порознь.

Подстуживание

Подстуживание закаливаемых изделий небольшой толщины до 720—750° может производиться в очень многих случаях. Более глубокое подстуживание до 550—650° производится только при закалке изделий из сталей, обладающих значительной устойчивостью аустенита в области перлитного превращения. Подстуживание изделий, нагретых до закалочных температур, перед погру-

жением их в жидкие среды может производиться как на воздухе, так и в печах, колодцах, а также в специальных контейнерах. Подстуживание на воздухе менее совершенно, так как оно обуславливает сильное и неравномерное охлаждение поверхности: сердцевина же при этом охлаждается недостаточно. Кроме того, подстуживание на воздухе плохо поддается регулировке и температурному контролю. Вследствие этого воздушное подстуживание применяется преимущественно при закалке изделий небольшой толщины.

Подстуживание в печах и контейнерах более совершенно: оно исключает возникновение больших перепадов температуры по сечению изделий; снижение температур происходит более равномерно и сам процесс лучше поддается контролю. Такое подстуживание может применяться как для толстых, так и для тонких изделий.

Целью подстуживания обычно является снижение уровня тепловых напряжений в изделиях, уменьшение коробления, изменение количества остаточного аустенита и т. д. Подстуживание толстых, массивных изделий перед закалкой их в масле, кроме того, позволяет резко снизить тепловую нагрузку на закалочные баки. В связи с тем, что на уровень тепловых напряжений подстуживание наиболее сильно влияет только в начальный период охлаждения, на уровень остаточных закалочных напряжений, а также на снижение трещинообразования оно влияет слабо.

Следует учитывать, что снижение тепловых напряжений, вызываемое подстуживанием, в некоторых случаях может оказаться нежелательным и привести к усилению действия структурных напряжений.

Ограничение температур конца быстрого охлаждения

Эффективным способом снижения образования дефектов в закаливаемых изделиях является ограничение температур конца быстрого охлаждения. Как известно, быстрое охлаждение при закалке необходимо только в тех областях температур ниже A_1 , в которых аустенит обладает пониженной устойчивостью, а получающиеся продукты его распада являются нежелательными. Напротив, быстрое охлаждение близ M_n и особенно в самом интервале мартенситного превращения является не только нежелательным, но и крайне вредным.

Во избежание получения закалочных дефектов, обусловленных закалочными напряжениями, быстрое охлаждение изделий в жидких средах следует заканчивать не тогда, когда температура их станет близкой к температуре среды, а значительно раньше, когда температура их центра будет еще на 30—50° выше температуры начала мартенситного превращения. Это необходимо для того, чтобы в самом интервале образования мартенсита скорости охлаждения были умеренными. Такое ограничение скорости охлаждения в быстроохлаждающих средах осуществлять затруднительно, особенно при закалке тонких и средних по толщине изделий.

Поэтому при выполнении закалки с ограниченным быстрым охлаждением необходимо принимать все меры, способствующие более высокой точности и идентичности выполнения самого режима охлаждения. Так как нормирование охлаждения при этом обычно осуществляется по времени, то следует устранить все причины, изменяющие охлаждающую способность среды, т. е. ограничить колебания температуры и интенсивность циркуляции. При закалке в воде необходимо устранить, кроме того, и свойственную ей неоднородность охлаждения добавкой в нее солей или щелочей.

При закалке толстых изделий с ограничением температур конца быстрого охлаждения контроль может осуществляться не только по времени, но и по температуре поверхности.

35. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ И РАВНОМЕРНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ

При охлаждении толстых изделий в быстроохлаждающих средах, как уже указывалось, получают большие перепады температур по сечению изделий. Поэтому прекращение быстрого охлаждения центра близ M_n не исключает излишне быстрого охлаждения поверхностных слоев в период образования мартенсита и вследствие этого появления трещин. Более эффективным способом предупреждения образования трещин для средних и толстых изделий является применение прерывистого охлаждения или купания, а также душевого и струйного охлаждения.

Охлаждение купанием

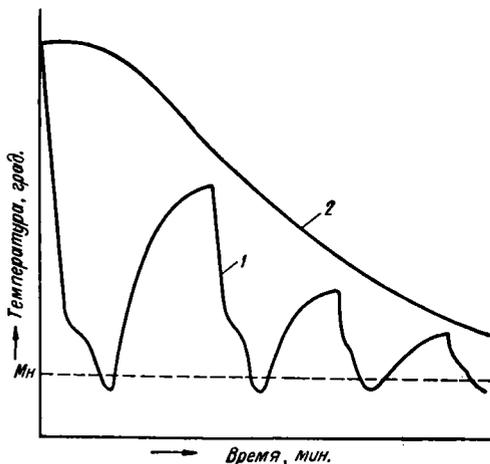
При охлаждении купанием нагретые изделия после непродолжительного охлаждения в воде извлекаются из нее и некоторое время выдерживаются на воздухе, а затем опять погружаются в жидкость. Таких извлечений и погружений делается несколько. Число их тем больше, чем больше толщина изделия. Охлаждение в этом случае производится последовательно в двух средах до цеховых температур. Совершенно очевидно, что при выдержке в жидкой среде перепад температур получается большим (фиг. 50), а при выдержке на воздухе он снижается. В первый период охлаждения изделия в воде температура его поверхности часто падает ниже M_n . Если при этом достигается верхняя критическая скорость, то в поверхностном слое изделия образуется мартенсит, а в середине изделия сохраняется аустенито-мартенситная и аустенитная структуры. При извлечении изделия из воды на воздух поверхность его за счет притока тепла изнутри разогревается. Величина разогрева зависит как от температуры центра и толщины изделия, так и от продолжительности пребывания изделия на воздухе. За счет разогрева поверхностных слоев происходит отпуск образовавшегося там мартенсита, в результате чего получается троостит или сорбит отпуска. Последняя структура весьма эффективно предохраняет изделия от получения поверхностных трещин в процессе дальнейшего охлаждения. Последующее быстрое

охлаждение сорбитового слоя на поверхности не вызывает образования закалочных трещин в нем. В то же время сам поверхностный слой, обладающий высокой пластичностью, вязкостью и значительной прочностью, препятствует образованию трещин как на поверхности, так и внутри изделия.

При извлечении изделия из жидкой охлаждающей среды одновременно с поверхностным слоем разогреваются, хотя и в меньшей мере, слои более удаленные от поверхности, состоящие из аустенита. Дополнительный разогрев последнего не только задерживает его охлаждение, но и несколько повышает его устойчивость. Изде-

лие, закаленное купанием в воде, будет на поверхности иметь продукты распада мартенсита, а на большей глубине — аустенита.

Совершенно очевидно, что при составлении режима прерывистого охлаждения в одной жидкой среде следует учитывать, что слишком кратковременное первичное пребывание изделия в жидкой среде не обеспечивает получения достаточной толщины закаленного слоя на поверхности и, наоборот, слишком продолжительное пребывание его в жидкой среде может привести к образованию закалочных дефектов. С другой стороны, первая выдержка



Фиг. 50. Охлаждение поверхности (1) и центра (2) толстых изделий в процессе их закалки купанием в резкоохлаждающей среде (схема).

изделия на воздухе после охлаждения в жидкой среде предопределяет степень повторного разогрева поверхности и, следовательно, уровень твердости металла поверхности, а также степень уменьшения перепада температур по сечению.

Охлаждение центра изделия в жидкости после первого выноса на воздух существенно замедляется вследствие повторного возникновения паровой пленки и снижения перепада температур по сечению изделия. Следовательно, вынос изделий на воздух замедляет процесс охлаждения не только в самый момент пребывания изделий на воздухе, но и в течение некоторого времени после повторного их погружения в жидкость. Прерывистое охлаждение изделий, обрабатываемых на среднюю и низкую твердость, практически может быть применено для очень большого количества изделий.

Однако расчет таких режимов на основе имеющихся практических данных в виде графиков и номограмм является затруднительным, а в ряде случаев невозможным. Поэтому такие режимы

после предварительного расчета или без него окончательно уточняют опытом, что наиболее целесообразно лишь при серийном производстве. Хорошо отработанный режим прерывистого охлаждения в воде при наличии вполне удовлетворительной прокаливаемости и отсутствии неисправимых закалочных дефектов может полностью исключить необходимость применения закалочных масел.

В большинстве случаев процесс прерывистого охлаждения в воде толстых изделий заканчивается охлаждением их в масле. Это обусловлено тем, что осуществление замедленного охлаждения близ температур M_n путем погружения и извлечения изделий из воды становится затруднительным вследствие резкого сокращения продолжительности пребывания изделий в жидкости. В этом случае охлаждение производится уже не в двух, а в трех средах. В случае значительной разницы в толщине вдоль изделия, ее необходимо учитывать при составлении режимов охлаждения, более толстые участки охлаждать в воде соответственно более продолжительное время и число выносов из воды на воздух для них устанавливать также большим.

Контроль при прерывистом или ограниченном охлаждении в серийном производстве осуществляется по времени. Дополнительно к этому часто проверяется температура поверхности изделий с помощью термопар касания, а также химических индикаторов, изменяющих свою окраску при определенных температурах.

Уровень механических свойств после прерывистой закалки получается выше, чем после обычной закалки в одной умеренно охлаждающей среде.

Несмотря на все достоинства прерывистой закалки, выполнение ее является все же затруднительным. Поэтому естественно, что в целях упрощения режима закалки толстых изделий из сталей, склонных к образованию трещин при охлаждении в воде, исследователями непрерывно делаются попытки разработки сред, охлаждающих значительно быстрее масла и в то же время не вызывающих образования трещин.

Одновременно с этим используются и более совершенные в смысле регулировки способы охлаждения, такие, как душевое и струйное охлаждение.

Душевое и струйное охлаждение

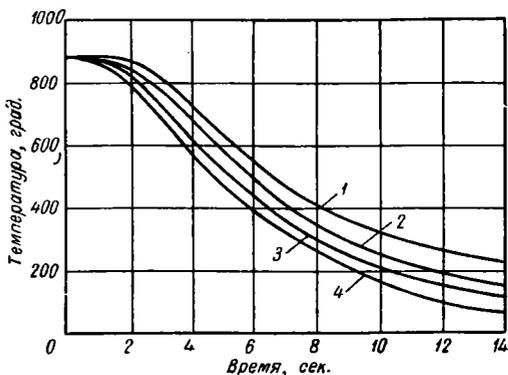
Душевое охлаждение осуществляется с помощью брызгал или спрееров. В качестве охлаждающей жидкости при душевом охлаждении используется вода, а также эмульсии на водной основе. В некоторых случаях для этой цели используется воздух. Наиболее часто душевое охлаждение применяется при поверхностной закалке самых различных изделий, местной закалке штампов, закалке рельсов, бандажей, валков холодной прокатки.

Вода при душевом охлаждении подается через брызгала под давлением от 0,25 до 6 *ата*; воздух — под давлением до 4 *ата*.

В некоторых случаях в целях лучшего раздробления капель воды применяется распыление ее воздухом.

Механизм охлаждения водяным душем принципиально не отличается от механизма охлаждения погружением в жидкости. Однако душевое охлаждение имеет свои особенности.

Вследствие того, что отдельные капли воды при охлаждении душем ударяются о нагретую поверхность, а также благодаря значительно лучшим условиям отвода пара, критическая температура устойчивости паровой пленки повышается, в силу чего сильно расширяется стадия пузырчатого кипения. Кроме того, вследствие



Фиг. 51. Зависимость процесса душевого охлаждения сферического образца размером 1 дм от величины напора воды (18—22°):

1 — атмосферное давление; 2 — $p = 2,8$ ати; 3 — $p = 5,6$ ати; 4 — $p = 7,7$ ати.

Скорость охлаждения душем значительно меньше зависит от температуры воды, чем скорость охлаждения погружением. Зависимость процесса охлаждения от давления воды приведена на фиг. 51 [32].

Регулируя подачу воды давлением, можно очень плавно изменять интенсивность охлаждения в широких пределах, что является главным достоинством способа. Значительно меньшими возможностями обладает охлаждение воздушным душем, так как для обеспечения высоких скоростей охлаждения необходимо применение высоких скоростей и давления воздуха, при которых получается неравномерное охлаждение. В целях интенсификации воздушного охлаждения его комбинируют с водяным охлаждением, производя распыление воды воздушной струей. Недостатком душевого охлаждения при закалке является необходимость изготовления на каждый вид изделий специальных установок с брызгалами, а часто и приспособлений для перемещения охлаждаемых изделий. Несмотря на то, что душевое охлаждение при закалке используется уже давно, объем применения его в настоящее время, исключая поверхностную закалку, относительно невелик. По всей

обильного притока к охлаждаемой поверхности и кратковременного контакта с нею жидкость не успевает перегреться. Все это обуславливает резкое повышение скорости и равномерности охлаждения при душевой закалке. Интенсивность душевого охлаждения, при прочих равных условиях зависит от величины напора воды, расстояния от брызгала до изделия, количества, размера и расположения отверстий в брызгале и угла встречи струи с охлаждаемой поверхностью. Ско-

вероятности, применимость этого способа по мере автоматизации и механизации процессов термической обработки получит дальнейшее распространение.

Наряду с душевым применяется струйное охлаждение. Последнее отличается тем, что подача жидкости или воздуха осуществляется не каплями или тонкими струйками, через ситовые брызгала, а одной или, реже, несколькими толстыми струями через сопла. Чаще всего при этом струя подается не перпендикулярно охлаждаемой поверхности, как при душевом охлаждении, а параллельно ей или под углами. В связи с этим, условия для разрушения паровой пленки здесь, так же как и условия отвода пара, несколько хуже, чем при душевом охлаждении. Струйное охлаждение более, чем душевое, сходно с обычным охлаждением изделий погружением в большие объемы жидкости с усиленной циркуляцией. Оба эти вида охлаждения в ряде случаев совмещаются, т. е. деталь охлаждается погружением в бак с жидкостью и одновременно отдельные поверхности изделия дополнительно охлаждаются сильной струей этой же жидкости.

Чаще всего струйное охлаждение применяется при охлаждении внутренних полостей изделий при местной закалке.

Душевое и струйное охлаждение часто производится по специальным режимам с перерывами.

Автоматизация этих процессов резко расширяет возможности регулирования процесса охлаждения. К сожалению, охлаждение как водой, так и воздухом при использовании очень больших давлений и скоростей охладителей не обеспечивают равномерного охлаждения поверхности изделий сложной формы вследствие образования «мешков» и завихрений во внутренних углах, впадинах, уступах и пр.

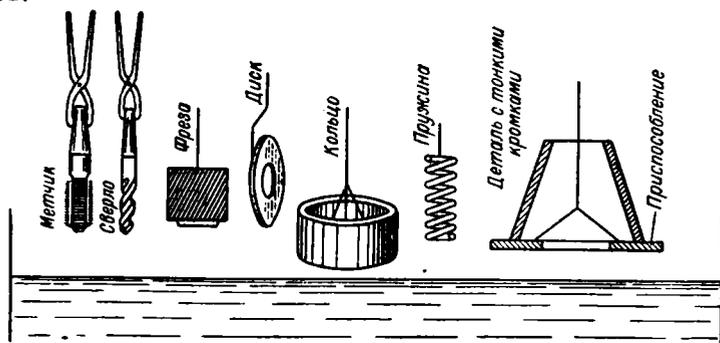
36. СПОСОБЫ ПОГРУЖЕНИЯ ЗАКАЛИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ

При обычной закалке способы погружения нагретых изделий в закалочные баки играют большую роль в получении удовлетворительных результатов закалки, т. е. без дефектов. При неправильном погружении в закалочную жидкость резко возрастает коробление, увеличивается неоднородность твердости и, наконец, возникают закалочные трещины. Различные детали при закалке погружаются в жидкость по-разному. Однако во всех случаях способ погружения должен обеспечивать возможно более равномерное охлаждение различных частей изделия, для чего всегда должна обеспечиваться возможность свободного выхода образующихся при кипении жидкости паров. Нельзя допускать, чтобы при погружении изделий в жидкость скоплялись пары в замкнутых полостях изделия, глухих отверстиях, входящих углах и пр. С другой стороны, способ погружения изделий должен обеспечивать отсутствие коробления раскаленных изделий под влиянием собственного веса, а также коробления в результате неравномерного их охлаждения.

Практикой выработаны следующие правила погружения закаливаемых изделий в жидкие среды (фиг. 52).

1. Изделия, имеющие неодинаковую толщину, должны погружаться сперва толстой, а затем тонкой частью. В некоторых случаях, при наличии тонких кромок на цилиндрических или конических изделиях, рекомендуется применение приспособлений, увеличивающих тепловую инерцию этих кромок.

2. Изделия с замкнутой полостью должны погружаться так, чтобы открытая сторона полости, в целях обеспечения выхода пара, была обращена вверх. Погружение изделий выходом полости вниз вызывает скопление пара в полости и образование паровых мешков.



Фиг. 52. Рекомендуемые способы погружения изделий в закалочные баки [9].

3. Длинные изделия типа ходовых винтов, разверток и сверл, во избежание коробления, должны погружаться в строго вертикальном положении.

4. Тонкие плоские детали, имеющие форму дисков, следует погружать на ребро.

5. Тонкостенные кольца должны погружаться так, чтобы их образующая занимала вертикальное положение.

6. Закалку листовых деталей необходимо производить на ребро. При закалке тонких листовых деталей пакетами погружение их может производиться и плашмя, но с обязательной установкой между отдельными деталями металлических прокладок. Высота прокладок должна быть тем большей, чем толще детали и чем больше их площадь. Количество прокладок должно обеспечивать отсутствие коробления изделий.

7. Охлаждение изделий, закаливаемых в приспособлениях или на цепях конвейера, должно производиться так, чтобы при этом обеспечивалось равномерное охлаждение всей их поверхности. Поэтому нельзя допускать скопления изделий, плотно прилегающих друг к другу.

8. Охлаждение тонких изделий, обладающих недостаточной конструктивной жесткостью в нагретом состоянии (дисков, шестерен, валиков, рессор и пр.), рекомендуется производить в закалочных прессах или в специальных закалочных устройствах, а в некоторых случаях в металлических плитах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блантер М. Е., Скорость охлаждения при закалке и прокаливаемость стали, «Заводская лаборатория», 1949, № 5.
2. Богатырев Ю. М., Плешачкова В. П., Охлаждающие среды при электрозакалке стали, «Металловедение и обработка металлов», 1956, № 11.
3. Вишняков Д. Я., Технология обработки стали, Сборник XXVI Московского института стали, 1948.
4. Вишняков Д. Я., Неустроев А. А., Определение охлаждающей способности расплавленных солей, «Заводская лаборатория», 1958, № 1.
5. Волков С. С., Певзнер Л. Е., Садовский В. Е. Светлая закалка стали в расплавленных щелочных средах, Оборонгиз, 1952.
6. Вопросы теплообмена при изменении агрегатного состояния вещества, сталей, под ред. С. С. Кутателадзе, Госэнергоиздат, 1953.
7. Гуляев А. П., Лебедева Е. А., Соколовская В. В., Ступенчатая закалка в расплавах едких щелочей, сб. «Металловедение и термическая обработка», Машгиз, 1955.
8. Ерохин А. П. и Самохин И. П. Механизация и автоматизация в термических цехах, Машгиз, 1953.
9. Захаров Б. П., Термическая обработка металлов, Машгиз, 1957.
10. Клапцов К. К., Номограмма для расчета продолжительности охлаждения центра изделий при закалке и нормализации, «Металлург», 1932, № 10—11 (40—41).
11. Кутателадзе С. С. Теплопередача при конденсации и кипении, Машгиз, 1952.
12. Лосиков Б. В., Физико-химические основы регенерации масел. Гостоптехиздат, 1948.
13. Немчинский А. Л., Металловедение, сборник статей, Судпромгиз, 1957.
14. Немчинский А. Л., Тепловые расчеты термической обработки, Судпромгиз, 1953.
15. Неруш Н. А., Водные растворы жидкого силиката как охладители при закалке стали, «Вестник Металлопром», 1936, № 1.
16. Новые методы термической обработки в расплавленных солях и щелочах, под ред. А. И. Зотьева, Горьковское книжное из-во, 1955.
17. Онисимов А. Г., Влияние охлаждающей среды на свойства закаливаемой стали, сб. «Структура и свойства стали», Металлургиздат, 1949.
18. Петраш Л. В., Закалочные среды высокой охлаждающей способности, «Металловедение и обработка металлов», 1958, № 3.
19. Плетенева Н. А., Ребиндер П. А., Влияние поверхностно активных веществ на испарение капель воды в сферoidalном состоянии, ЖФХ, 1946, вып. 9.
20. Просвирин В. И., Новиков В. Н., Использование водородного водного раствора в качестве охлаждающей жидкости при закалке стали, «Вестник металлопромышленности», 1937, № 10.
21. Равич М. И., Гинзбург Ф. Б., Известия АН СССР, ОХН, № 2, 141, 1947.

22. Сидорин И. И., Арзамасов Б. Н., Исследование горячих сред для изотермической обработки стали, «Металловедение и термическая обработка металлов»: Сборник МВТУ № 41, Машгиз, 1955.
 23. Скотников В. Я., «Вестник металлопромышленности», 1934, № 8—9, 82.
 24. Смирнов А. В., Бабошин А. А., Масалов Н. И. Закалка и цементация в жидких средах, Госметаллургиздат, 1933.
 25. Технические нормы на нефтепродукты, Гостоптехиздат, 1955.
 26. Хазан А. Н., Критерии и методика оценки охлаждающей способности закалочных жидкостей, «Заводская лаборатория», 1948, № 2.
 27. Цетлин Б. В., Безопасность труда при процессах термической обработки металлов, Профиздат, 1955.
 28. Шмыков А. А., Справочник термиста, Машгиз, 1956.
 29. Штейнберг С. С., Охлаждающие среды для закалки; Термическая обработка (курс лекций), лекция 14, НИТО металлургов, 1939.
 30. Eller, Histoire de l'Academia de Berlin, 42, 1746.
 31. Engel N., Untersuchungen über die Stahlhärtung, 1931.
 32. French H. I., Transactions ASST, vol. XVII, 1930.
 33. Grossman M. A. a. Asimow M., Hardenability and Quenching. The Iron Age, апрель—май, 1940.
 34. Kreiner H., Swoboda K., Archiv f. d. Eisenhüttenwesen, 17 J H. 7/8, Jan./Febr., 1944.
 35. Le-Chatelier M. H. Revue de Metallurgie, vol. 1, 473, 1904.
 36. Leidenfrost J. D. De agnal communis nonnullis qualitibus, Duislurg, 1756.
 37. Lueg W. u. Pomp A., Stahl u. Eisen, H. 11, 1941.
 38. Mc Adams W. H., Heat Transmission, s. s. N—J, 1942.
 39. Miscicki i. Broder, Rocznicki Chem. 6, 319, 1926.
 40. Peter W., Archiv f. d. Eisenhüttenwesen, 21, 1950.
 41. Pilling N. B. a. Lynch T. D., Transactions of the Am. Inst. of Mining Engrs., vol. LXII, 1919.
 42. Rose A., Archiv f. d. Eisenhüttenwesen., II, 345 (1940).
 43. Wever F. Archiv f. d. Eisenhüttenwesen, Bd. 5 (1931/1932), S. 367.
-

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение | 3 |
| Глава I. Особенности охлаждения в различных средах | 5 |
| 1. Охлаждение без изменения агрегатного состояния среды | 6 |
| 2. Охлаждение с изменением агрегатного состояния среды | 8 |
| 3. Особенности охлаждения поверхности и сердцевины изделий в низкокипящих средах | 15 |
| Глава II. Оценка закалочных сред | 18 |
| 4. Оценка по твердости | — |
| 5. Оценка по кривым охлаждения | — |
| 6. Оценка по скорости охлаждения при 720°С | 19 |
| 7. Оценка по скорости охлаждения в перлитном и мартенситном интервалах температур | 22 |
| 8. Оценка по кривым зависимости скорости охлаждения от температуры образца | — |
| 9. Оценка по кривым зависимости коэффициентов теплоотдачи от температур охлаждаемой поверхности | 28 |
| Глава III. Охлаждение в средах на водной основе | 33 |
| 10. Свойства воды | — |
| 11. Охлаждение в спокойной воде | 34 |
| 12. Влияние нагрева воды | 36 |
| 13. Влияние циркуляции воды | 37 |
| 14. Влияние примесей | 39 |
| 15. Охлаждение в растворах солей | 46 |
| 16. Охлаждение в растворах щелочей | 50 |
| 17. Охлаждение в растворах кислот | 53 |
| 18. Охлаждение в растворах глицерина | 54 |
| 19. Охлаждение в растворах жидкого стекла | 56 |
| 20. Охлаждение в растворах мыла | 58 |
| 21. Охлаждение в эмульсиях и суспензиях | 60 |
| Глава IV. Охлаждение в маслах | 62 |
| 22. Особенности охлаждения в маслах | 63 |
| 23. Влияние начальной температуры масла | 65 |
| 24. Влияние циркуляции | 66 |
| 25. Охлаждение в минеральных маслах | 67 |
| 26. Охлаждение в растительных маслах и жирах | 72 |
| 27. Изменение свойства масел в процессе работы | 73 |
| 28. Регенерация масел | 75 |
| 29. Закалочные баки и охладительные установки | 78 |

| | |
|---|-----|
| Глава V. Охлаждение в расплавах металлов, солей и щелочей | 82 |
| 30. Охлаждение в жидких металлах | 83 |
| 31. Охлаждение в солях и щелочах | 85 |
| 32. Соляные ванны | 97 |
| 33. Щелочные ванны | 99 |
| Глава VI. Особые способы охлаждения | 101 |
| 34. Ограничение интервала быстрого охлаждения | — |
| 35. Регулирование скорости и равномерности охлаждения | 103 |
| 36. Способы погружения закаливаемых изделий | 107 |
| Литература | 109 |

Леонид Васильевич ПЕТРАШ
ЗАКАЛОЧНЫЕ СРЕДЫ

Редактор издательства *И. А. Бородулина*

Технический редактор *Л. В. Щетинина*

Корректор *Э. А. Мирошниченко*

Подписано к печати 1/IV 1959 г.

М-05267.

Формат бумаги 60×92¹/₁₆

Печ. листов 7,0.

Уч.-изд. листов 7,6.

Тираж 4000 экз.

Заказ 416

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

| Стр. | Строка | Напечатано | Должно быть | По чьей вине |
|------|-------------|----------------------|--------------------------|--------------|
| 33 | 1-я снизу | 360° | 309° | Авт. |
| 33 | 19-я сверху | 15° 1 ккал/кг-град и | 1 ккал/кг-град при 15° и | Корр. |
| 47 | 18-я снизу | Подробно | Подобно: | . |
| 51 | 7-я сверху | раствора | кипения раствора | Авт. |