

621/18
И 20

Проф. В. В. ИВАНОВ

АХБССТ

ПРИЧИНЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПАРОВЫХ КОТЛОВ



ПИЩЕПРОМИЗДАТ
МОСКВА — 1944

Замеченные опечатки в книге В. В. Иванова
„Причины повреждений паровых котлов“

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать	По чьей вине
8	20 сверху	участвующей в общей части водой	участвующей в общей циркуляции водой	авт.
19	13 сверху	фосфаты	фосфиды	авт.
27	7 снизу	внутренние трубы, проходящие	внутренние — по трубе, проходящей	авт.
36	1 снизу	котла	топки	авт.
41	18 снизу	сульфитами	сульфидами	авт.

021
420

Проф. В. В. ИВАНОВ

АЖБС
621.18
1120

ПРИЧИНЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

40831

12804

11/006 82, 08
Аеп.

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА СССР

ПИЩЕПРОМИЗДАТ
МОСКВА — 1944

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Введение :	5
Экономичность и безопасность работы котлов	5
Структура и свойства котельной стали	14
Причины повреждений паровых котлов	25
Недоброкачественность материала и недостатки изготовления	28
Пороки и дефекты структуры материала	37
Нецелесообразность конструкции, нарушение циркуляции и неправильность установки котлов	58
Ненормальные условия эксплуатации и плохое обслуживание котлов . .	66

Редактор *Л. Леонидава*

Л21458.	Подписано к печати 4/X 1944 г.	Объем 5¼ п. л.
Тираж 5000 экз.	Цена 4 руб. 50 коп.	Уч.-изд. 6 л. Заказ 119.

г. Калуга, типография им. Воровского, Госпланиздата.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая работа является результатом обследования паровых котлов, взятых под сомнение по своему состоянию, преимущественно по возрасту и повреждениям, полученным ими после аварий. Целью обследования было определение годности поврежденных котлов к дальнейшей работе и составление плана по замене их новыми. За период 1935—40 гг. было осмотрено на разных предприятиях пищевой промышленности по заданию Энергопроекта НКПС около 1500 котлов самых разнообразных систем и типов. При обследовании встретились котлы, начиная от простых цилиндрических и шатровых с кипятильниками, с ручными толками, постройки 90-х и даже 80-х годов, на давление 4 ати, кончая однобарабанными вертикально-водотрубными экранированными с механическими и пылеугольными толками на давление 34 ати, выпуска последних лет. Пришлось даже встретить локомобиль, являющийся уникалом по продолжительности его работы и дорабатывающий на давлении 2 ати. На сохранившейся заводской табличке значится: «Гаррет и сын, 1857 г.».

Состояние котлов оказалось самым разнообразным. Встречались хорошо сохранившиеся котлы Шухова, постройки 1894 г. и Бабкока-Вилькокса 1892—1896 гг., работающие на давление 8 ати, в то же время у котлов последних годов изготовления трех барабанных вертикально-водотрубных на давление 17 ати обнаруживались трещины на продольных швах накладок и обечеек барабанов, а у однобарабанного вертикально-водотрубного котла в цельнотянутой камере бокового экрана — расслоение и плена с максимальной толщиной отставшего слоя до 18 мм при первоначальной толщине стенки в 23 мм.

Забракован был горизонтально-водотрубный котел Бред — Берлингер 1892 г. вследствие обнаруженных при механическом испытании расслоений в два-три слоя и полученных низких показателей по относительному удлинению сварочного железа, из которого были изготовлены барабаны, тогда как батарейные котлы Мозгрев и К° постройки 1879—1883 гг., также из сварочного железа, дали вполне удовлетворительные результаты по испытанию.

Из обнаруженных при исследовании дефектов структуры работающих котлов, наибольший процент падает на наличие структурно-свободного цементита, сфероидизацию перлита, а затем на посторонние включения и строчечную структуру. Реже обнаруживались дефекты в виде микротрещин, рекристаллизации, ликвации примесей и видманштетовой структуры.

Большинство этих дефектов структуры ведет свое начало со времени производства самого материала или образовалось во время изготовления котла, а не во время длительной службы последнего, т. е. дефекты эти являются природными, с которыми котел работал со времени установки.

Во всех случаях наиболее часто встречающийся дефект — это наличие выделений структурно свободного цементита, который ничем себя не проявлял ни до обнаружения, ни после проверочного механического испытания материала, и котлы как работали, так и продолжают работать.

Исследовательские лаборатории в своих заключениях объясняют возникновение некоторых дефектов структуры, особенно структурно свободного цементита, сфероидизации перлита, видманитетовой структуры и пр. действием длительного нагревания во время продолжительной эксплуатации котлов, что является для инспекции котлонадзора поводом для требования проверки качества материала механическими испытаниями, сопряженными с нарушением целостности котлов вырезками образцов.

Поэтому для предотвращения бесцельной вырезки образцов для механического испытания материала в настоящей работе преследуется рассмотрение причин образования различных пороков и изменений структуры котельных материалов и повреждений паровых котлов, а равно установление возможности возникновения дефектов структуры в условиях эксплуатации.

Полагая, что микроскопический анализ структуры дает более точные результаты в определении качества материала, чем механические испытания, в настоящей брошюре делается попытка подойти к объяснению свойств котельной стали на основании учения о сплавах и образования микроструктуры в зависимости от состава и температуры сплавов, т. е. более глубоко, нежели на основании сравнительных испытаний по ударной вязкости (исследования М. Ульриха и других).

По предложению Техсовета НКПС в тексте брошюры добавлены сведения по металлосведению, чтобы при чтении не прибегать к помощи справочников и учебников, а для более широкого круга читателей добавлено введение пропагандистического характера.

Автор.

ВВЕДЕНИЕ

Экономичность и безопасность работы котлов

Каждую котельную установку можно рассматривать как замкнутую хозяйственную единицу, эксплуатационная задача которой сводится к получению в требуемом количестве возможно дешевого пара для своевременной подачи его потребителю в условиях, не допускающих опасности для работы установки.

Удовлетворение такого требования зависит, с одной стороны, от правильной постановки работы, рационального обслуживания котельной установки и режима эксплуатации ее, а с другой — от прочности, надежности и безопасности работы котельных установок.

Все эти зависимости, включающие ряд многочисленных условий, вытекающих одно из другого и часто находящихся во взаимном противоречии между собой, тесно связаны с экономичностью работы установки. На себестоимость выработки пара, а потому и продукции производства, кроме амортизационных и эксплуатационных расходов, влияют степень использования и непрерывность работы установки и в еще большей мере — аварии и повреждения, нарушающие бесперебойность работы и выводящие частично или целиком установку из строя для ремонта. Поэтому доминирующее значение имеют прочность, надежность и безопасность работы паровых котлов как главных объектов установки, так и различных вспомогательных устройств и приспособлений.

Поскольку неравномерность нагрева стенки котла, вследствие отнятия тепла поверхностью нагрева у обогреваемых газов по пути их движения, и неравномерность прогрева воды, вследствие плохой ее теплопроводности, неустраняемы и естественны, — тепловые деформации котла неизбежны.

Передача тепла при чистой изнутри и снаружи стенке котла главным образом зависит от суммарной внешней передачи тепла наружной поверхности как лучеиспусканием, так и соприкосновением носителя тепла — горячих газов. Сопротивление переходу тепла, оказываемое стенкой, и от стенки к воде относительно мало. Тепловой поток встречает наибольшее препятствие при переходе от горячих газов к стенке котла. Плохая теплопередача от газов является причиной низкой производительности поверхности нагрева. При этом практически совершенно безразлично, из чего сделана котельная стенка — из железа или из меди, обладающей большей теплопроводностью.

Обыкновенно стенка не бывает чистой; на ней имеется слой нагара, сажи и золы снаружи и слой накипи и грязи внутри. Теплооте, поглощённой внешней поверхностью, приходится преодолевать сопротивления наружного и внутреннего слоя загрязнений.

Степень чистоты оказывает влияние как на температуру стенки, так и на тепловые деформации котла, что, с одной стороны, зависит от отлагаемых питательной водой внутренних загрязнений, повышающих температуру стенки, а с другой — от осаждаемых обрабатываемыми газами внешних загрязнений, понижающих температуру стенки. Поэтому для уменьшения влияния тепловых деформаций и расхода топлива нужно стенки держать возможно чистыми от внутренних и внешних загрязнений. Внутреннее загрязнение вызывает застой тепла, перегрев стенки и образование выпучин, а внутреннее — сильно увеличит расход топлива.

Поэтому всякие ухищрения для увеличения паросъёма, как пришлось дважды встречать на разных предприятиях, — путем помещения в котел стружки красной меди, — увеличивают лишь сопротивление теплопередаче и способствуют загрязнению и застою тепла в стенке.

Повышение производительности котлов достигается улучшением условий теплопередачи и усилением циркуляции. Для этого стараются увеличить долю тепла, поглощаемого котлом путем лучеиспускания, и улучшить условия теплопередачи соприкосновением газов с поверхностью нагрева. Первое достигается увеличением лучеиспускающих и лучевоспринимающих поверхностей колосниковых решёток и расположением поверхностей нагрева котлов по ширине; второе же требует увеличения скорости движения газов в дымоходах и хорошего перемешивания их путём многократного изменения направления движения. То и другое повышает сопротивление дымоходов, для преодоления которого применяют искусственную тягу.

Повышение напряжения котлов требует сжигания большего количества топлива. Это приводит к увеличению зеркала горения, высоты и объёма топки, при которых в топочном пространстве получаются равномерные и высокие температуры, дающие возможность полного перемешивания газов с воздухом, развития пламени и совершенного горения.

На интенсивность теплопередачи некоторое влияние оказывает скорость движения воды или пара, омывающих поверхность нагрева. Увеличение теплопередачи с усилением циркуляции приписывают также лучшему перемешиванию воды, в результате чего увеличивается разность температур стенок котла и воды. Чем сильнее циркуляция, тем быстрее стенки омываются водой, тем от них отводится большее количество нагретых частиц. Замена тёплых частиц более холодными способствует увеличению разности температур.

Циркуляция, кроме повышения теплопередачи, необходима для выравнивания температуры воды в котле и отвода тепла от по-

верхности нагрева. Охлаждая стенки, циркуляция не допускает застоя тепла, т. е. устраняет неблагоприятное действие на прочность железа и способствует безопасной работе котла. Циркуляция является главным фактором безопасности работы котла.

Циркуляционные потоки препятствуют оседанию и прикипанию накипи, смывают пузыри пара и газа, выделяющиеся из воды и прилипающие к стенкам. Это предотвращает образование паровых мешков, сопряженное с перегревом стенки и появлением отдулин, и предохраняет от окисления и разъедания стенок газами.

Поэтому стремление улучшить теплопередачу со стороны газов имеет больший смысл. Установлено, что передача тепла растёт с увеличением разности температур горячих газов и омываемой ими стенки котла. Так же, хотя и слабее, теплопередача увеличивается с повышением температуры газов и их плотности. Наиболее сильное влияние на теплопередачу оказывают скорость движения и завихрение газов, омывающих поверхность нагрева.

Коэффициент лучеиспускания не зависит от скорости движения газов. Передача тепла лучеиспусканием более интенсивна, чем передача его соприкосновением. Прямая отдача тепла с повышением температуры возрастает не прямо пропорционально, а более быстро, так как значения температур входят в формулу Стефана-Больцмана в четвёртой степени. Кроме зависимости от величины и взаимного расположения лучеиспускающей и лучепринимающей поверхностей, коэффициент лучеиспускания, хотя и медленно, растёт с увеличением толщины слоя газов. Поэтому чем выше температура лучеиспускающего тела и чем толще слой газа, тем сильнее влияние лучеиспускания.

В топке, где имеется высокая температура и большая толщина слоя газов, скорость их должна быть меньшей, а в дымоходах, где газы более холодные и объём их меньше, наоборот, толщина слоя должна быть меньшей и скорость газов большей.

Таким образом, вследствие различного соотношения между величинами передаваемого тепла лучеиспусканием и соприкосновением в разных частях напряжение частей поверхности нагрева также различно, в зависимости от чего поверхность нагрева делят на радиационную и конвекционную.

Для увеличения паропроизводительности выгодно использовать прямую отдачу тепла горящего топлива (лучеиспускание). Это привело к стремлению развивать радиационную поверхность устройством в топке экранов, состоящих из рядов водяных трубок, соединённых с котлом. В свою очередь экраны защищают кирпичную кладку топочной камеры от разрушения и действия высокой температуры.

Наиболее энергично действует радиационная поверхность нагрева, находящаяся непосредственно под излучением тепла. По мере же удаления от топки нагрузка поверхности и парообразование быстро падают.

Характер и интенсивность циркуляции всецело зависят от системы и конструкции котла. В котлах с большим объемом воды и большими сечениями для движения воды и пара происходит естественная циркуляция со свободным перемещением тепла частицами воды и пара. Перемещение это направлено как от поверхности нагрева, так и к поверхности его с самопроизвольным обменом тепла между частицами, выравнивающими температуру.

Такую свободную естественную циркуляцию следует рассматривать не как постоянный организованный поток воды, а как прерывное неорганизованное течение смеси воды и пузырей пара, водосодержание которой постоянно меняется. При малой нагрузке поверхности нагрева образующиеся отдельные пузыри пара, всплывая в восходящем потоке воды нерегулярно и неравномерно, прорываются на поверхность, а некоторые увлекаются обратным нисходящим движением. С возрастанием нагрузки поверхности нагрева и паропроизводительности циркуляция становится более равномерной и плавной.

Недостаточно интенсивная циркуляция и неправильный ввод питания, особенно в нижние части котла со слабо участвующей в общей части водой, создают местные охлаждения и зоны пониженной температуры, наблюдаемые обычно в котлах с большим объемом воды.

У котлов батарейных для улучшения циркуляции и свободного выхода пара подогревателям, и особенно кипятильникам, придают соответствующий уклон во избежание застоя пара у верхних стенок и образования паровых мешков.

У ланкаширских котлов под жаровыми трубами получают зоны со слабой циркуляцией воды, поэтому для оживления циркуляции у корнваллийских котлов жаровую трубу сдвигают вниз и в сторону, т. е. ставят не посередине, а эксцентрично как к вертикальной, так и к горизонтальной осям корпуса. Благодаря двустороннему смещению жаровой трубы корнваллийские котлы в смысле циркуляции стоят выше ланкаширских.

Для улучшения циркуляции кипятильным трубкам горизонтально-водотрубных котлов также придают наклон, соответствующий циркуляционному потоку.

Циркуляция в горизонтально-водотрубных котлах вследствие наличия камер осложняется разными циркуляционными напорами в кипятильных трубках. Испарительная способность верхних и нижних рядов трубок неодинакова и сильно изменяется по мере удаления их от топки.

Парообразование происходит главным образом в нижних трубках, верхние же почти не дают пара, и циркуляция в них очень слаба или даже происходит в обратную сторону, что вызывается интенсивным парообразованием в нижних трубках и недостаточным сечением водоподводящих и пароподводящих труб, соединяющих барабан с камерами. Такое торможение циркуляции, легко возни-

кающее особенно при значительной форсировке, может повлечь за собой образование отдулин и пережог трубок.

В целях улучшения циркуляции рекомендуется располагать трубки по ширине, а не увеличивать число их рядов по высоте, а также укорачивать трубки, что связано с увеличением их числа и уменьшением гидравлического сопротивления. Это и привело к постройке секционных котлов Бабкока-Вилькокса с поперечными барабанами, где верхние ряды трубок используются для отвода смеси пара и воды в верхний барабан, причём обратная циркуляция становится невозможной.

В котлах вертикально-водотрубных осуществляется вынужденная организованная циркуляция потоков по определенному замкнутому циркуляционному контуру, основанная на разности напоров столбов воды различного удельного веса: пароводяной эмульсии в переднем пучке подъёмных труб и воды в заднем пучке спускных, обуславливаемых различной интенсивностью обогрева восходящего и нисходящего потоков, а также высотой самих столбов.

Основным условием надёжности работы вертикально-водотрубных котлов является скорость и постоянство направления циркуляции.

Эксплуатационная практика и опыт показали, что наиболее удачными схемами организованной надёжной циркуляции являются трёхбарабанные котлы и двухбарабанные с раздвоенным о-образно изогнутым пучком трубок, а также трёхпучковые.

Котлы многобарабанные с запутанными схемами циркуляционных потоков не обладают устойчивостью направления циркуляции.

На величину движущей силы циркуляции, кроме разности напоров столбов воды и пароводяной эмульсии, влияют также возникающие при движении потока сопротивления: от трения о стенки, которое пропорционально длине труб и обратно пропорционально их диаметру, от изменения направления движения потока, поворотов и входа в трубки, от потери скорости выхода в барабаны. Эти сопротивления различны в подъёмных и спускных трубках вследствие неоднородности воды и эмульсии воды и пара.

Установлено, что причиной циркуляции и движущей силой её нельзя считать только напор, создаваемый разностью весов столбов воды и эмульсии в спускных и подъёмных трубках.

Силы сцепления между частицами пара и воды неодинаковы и имеют различную скорость движения. Образующиеся пузыри пара скользят в воде, испытывая направленную вверх силу, равную весу вытесненного ими объёма воды, и всплывая они увлекают за собой воду.

Чем теснее перемешаны между собой пузыри пара с водой, тем интенсивнее циркуляция. Эта смесь всё время меняется, причём, в зависимости от содержания пузырей пара, циркуляция то ослабевает и прерывается после их всплывания, то вновь нарастает и образует новые пузыри.

В вертикально-водотрубных котлах стремление образовавшихся

пузырей пара подняться способствует циркуляции в восходящих потоках, т. е. при совпадении движения воды и пара и, наоборот, при вскипании воды в нисходящих потоках, когда движение пара и воды не совпадает, тормозит циркуляцию.

Интенсивное обогревание передних рядов подъемного пучка, создавая значительную подъемную силу, может вызвать увеличение скорости циркуляционного потока и возрастание сопротивления в трубках спускного пучка. В результате малой подачи воды в нижний барабан менее обогреваемые задние ряды подъемных трубок превратятся в спускные, с нисходящим движением потока вместо восходящего, а потому скорость движения воды в них будет направлена обратно относительной скорости паровых пузырей, стремящихся подняться.

Если при таком торможении разность между скоростью опускающейся воды и обратно направленной ей относительной скоростью пузырей пара будет равна или близка к нулю, то создается возможность образования застоя пара и паровых пробок, которые повлекут за собой пережог и разрыв менее обогреваемых трубок задних рядов подъемного пучка.

Причиной такой аварии может быть также неправильный, уменьшенный подбор сечения трубок заднего пучка и соединительных труб между барабанами многобарабанных котлов.

Подобное явление может возникнуть при форсировке от парообразования в спускном или заднем пучке трубок. Тогда появившееся в спускных трубках интенсивное парообразование может вызвать торможение движения воды до скорости, равной скорости относительного движения пузырей пара, что создает возможность образования паровых пробок с теми же последствиями пережога трубок спускного заднего пучка.

Вскипание воды от чрезмерного обогрева спускного пучка может вызвать не только торможение, но привести к изменению направления циркуляции, превращая трубки переднего подъемного пучка или часть их в спускные, сопровождаемое пережогом трубок подъемного пучка, вследствие прекращения подачи воды в нижний барабан.

Необходимым условием отвода тепла от стенок и надежности циркуляции в парообразующих подъемных трубках при восходящем движении циркуляционного потока является совпадение направлений движения воды и пара, при котором большая относительная скорость пузырей пара (разность скоростей пара и воды) увлекает воду вверх. В спускных же трубках при нисходящем движении потока необходимо, чтобы относительная скорость пара пересиливалась скоростью воды и абсолютная скорость пузырей пара получила направление скорости воды, т. е. пар увлекался водой, или чтобы относительная скорость пузырей пара пересиливала скорость воды и пар свободно поднимался.

В зависимости от системы котла, состава и свойств питательной воды, а также качества сжигаемого топлива, котлы необходи-

мо очищать от накипи и грязи внутри, сажи и золы снаружи в установленные опытом сроки.

Загрязнение стенки уменьшает, судя по коэффициентам теплопроводности, теплопередачу, слой накипи оказывает меньшее влияние, чем налет сажи и золы.

Внутреннее загрязнение накипью со стороны воды, особенно маслом, повышает температуру стенки, отчего ослабляется её прочность от перегрева. Наружное загрязнение золой и сажой со стороны газов сильно ухудшает теплопередачу и увеличивает расход топлива. Механическими средствами борьбы с накипью являются приборы, называемые «накипарами», назначение которых — сосредоточить выделение накипи в определенном месте при вводе воды в котёл. Однако такие приборы загромождают котёл, а кроме того их трудно разбирать и вынимать из котла.

В последнее время получают распространение термосифонные пламоотделители, основанные на циркуляции столбов воды вследствие разности температур по сифонной трубке через отстойник, где скапливается плама.

Для более легкого отделения твердой накипи и предохранения железа от разъедания стенки котла после очистки промазывают тонким слоем мазута, керосина или натирают графитом и т. п. Однако подобная промазка едва ли целесообразна, так как большинство этих средств (исключая графит) имеет плохую теплопроводность, хотя и содействует отделению накипи, но не мешает ее образованию, а при излишке смазки может получиться перегрев стенки.

В котловую воду добавляют коллоидальные вещества, которые служат как бы накипеуловителями, обволакивают частицы образовавшейся накипи и препятствуют осаждению и отложению ее на стенках. Сущность всех способов — воспрепятствовать отложению накипи на стенках — сводится к уменьшению образования пузырей пара на поверхности нагрева и перенесению этого процесса от стенки во внутрь объёма котловой воды.

В котёл перед чисткой вводят химические реактивы, чтобы получить вместо твердой накипи рыхлый налам.

При применении таких средств кроме химического действия на металл нужно опасаться скоплений и обвалов отставшей накипи плохой теплопроводности, что ведет к образованию выпучин от перегрева стенки поверхности нагрева.

Недостатком способов очистки котловой воды является осаждение солей и грязи в самом котле. Эти способы могут применяться только в небольших котельных и при невысоких давлениях. Вообще же очистка питательной воды до поступления в котел предпочтительнее.

Фильтрация, очищение путем дистилляции, умягчение при помощи реактивов и деаэрация питательной воды до поступления ее в котел оказывают лучшее влияние на состояние и сохранность стенок парового котла.

При применении водоочистительных средств внутри котла, а также при питании его сырой (особенно илистой) водой необходимо производить учащенные продувки. Обычно продувку производят при пониженном давлении, во время перерыва работы и расхода пара, после предварительной подкачки воды не ниже верхнего уровня, когда бурление воды затихнет и грязь осядет.

Продувательный кран нужно открывать с особой предусмотрительностью, медленно, без большого усилия, не налегая на ключ, во избежание опасной аварии при заедании и поломке крана. Закрывать кран нужно поворотом пробки в ту же сторону, как и при открывании, чтобы ее поверхность не заедалась и срабатывалась равномерно. Не следует облегчать поворачивание крана ослаблением гайки или сальника, наоборот, при открывании крана нужно убедиться, что гайка, затягивающая пробку, хорошо закреплена.

При непрерывной работе котла, когда нет возможности понизить давление, котел продувают под рабочим давлением, но при ослабленном горении и наличии промежуточного вентиля между котлом и спускным краном, хотя такое требование правил и не дает выхода из положения.

Постановка вентиля как непосредственно у котла перед спускным краном, так и за этим краном не гарантирует безопасности продувки. Вентили и краны затрудняют удаление грязи и мелких кусочков накипи, вследствие чего могут получаться засорения и заедание.

Спускной кран обычно ставят в нижней части корпуса котла. Недостатком продувного устройства, особенно у цилиндрических и жаротрубных котлов, является ограниченность района их действия. Грязь удаляется лишь с мест, находящихся недалеко от крана, чем и объясняется внутреннее протравление нижней поверхности, особенно если под ней расположен газосход.

Самым важным условием экономичности работы котла является умелое ведение топки, а безопасности работы — надлежащий уход и правильное обслуживание котла.

Соотношение между котлом и топкой таково, что поверхность нагрева котла может производить пара гораздо больше, чем топка может дать для этой цели котлу тепла, что необходимо учитывать при ведении топки.

Поэтому стремление увеличить паросъем с поверхности нагрева и форсировку топки нужно согласовать как с величиной и размерами топочного пространства, так и с надежностью циркуляции. При перегрузке и напряженной работе топки может получиться неполнота сгорания, а при хорошей тяге — унос и догорание мелких частиц за котлом, что способствует образованию гремучей смеси и взрыву газов в дымоходах котла со всеми тяжелыми последствиями взрыва котла и даже разрушением боров и дымовой трубы. При сильном напряжении поверхности нагрева, недостаточном отводе тепла от стенок и выравнивании температуры в котле могут происходить, особенно в топочной части, застой пара и от-

дулины от перегрева стенки, ведущие к тем же последствиям взрыва котла.

Сохранность котельных установок обуславливается равномерным режимом питания, очисткой, смягчением и дегазацией питательной воды; регулярной чисткой котла от накипи и сажи, правильным уходом за топкой без допущения прогаров топлива и свободного доступа холодного воздуха через открытые двери, вредно влияющего на соединения котла, и исправностью обмуровки, так как присос воздуха через трещины и щели имеет вредное влияние.

Эксплуатационные повреждения и срок службы котла зависят от качества материала, питательной воды, форсировки котла и ухода за ним.

Для уменьшения потери тепла с уходящими газами через трубу и повышения коэффициента полезного действия котла, кроме улучшения теплопередачи, целесообразно тепло, теряемое через трубу, утилизировать на подогрев питательной воды и воздуха, вводимого в топку, ставя за котлами экономайзеры и подогреватели воздуха.

Выгоды от подогрева питательной водой заключаются не только в экономии расхода топлива, но и в большей сохранности котла.

Место поступления воды в котле испытывает меньше внутренних напряжений от разности температур, стенки котла меньше ржавеют, и меньше отлагается накипи, так как часть солей, находящихся в воде, при подогреве выпадает в виде осадка.

Питательная вода, поступающая в котельную установку, во избежание потения наружной поверхности стенок должна иметь температуру выше точки росы. Появление росы вызывает внешнее разъедание стенок особенно при большом содержании влажности и сернистых соединений в продуктах сгорания. Отходящие газы, непосредственно соприкасаясь с холодными стенками, охлаждаются сильнее, чем слои более удаленные. Температура точки росы, при которой начинается конденсация водяных паров, находящихся в отходящих газах, определяется по их парциальному давлению и зависит от состава топлива.

На коэффициент полезного действия котельной установки и на совершенное и полное сгорание топлива влияет коэффициент избытка воздуха, который в свою очередь зависит от состояния, состава и способа сжигания топлива, конструкции, устройства и обслуживания топки, размеров топочного пространства.

Большой избыток воздуха понижает температуру топки и увеличивает потерю тепла с уходящими газами через трубу, а при недостатке воздуха происходит неполное сгорание топлива, увеличивающее потерю тепла от химической неполноты горения.

Правильное обслуживание и контроль работы топки и котла осуществляются при помощи приборов и аппаратов, дающих полную картину экономичности работы. Приблизительно можно судить по цвету пламени в топке и густоте дыма над трубой. При отсутствии

дыма над трубой возможен излишек воздуха в топке или содержание окиси углерода, которая не дает дыма.

Принято считать, «если топка идет впрок, над трубой должен виться легкий серенький дымок», указывающий, что процесс горения проходит без избытка воздуха и неполноты горения.

В заключение нужно отметить, что система котла должна соответствовать условиям работы и характеру производства.

Котлы с большим объемом воды пригодны для работы при неравномерном расходе пара и сравнительно низких рабочих давлениях для технологических надобностей, переноса теплоты, нагревания и варки фабриката в производственных аппаратах.

Котлы с малым объемом воды выгоднее использовать при равномерном расходе пара и повышенных давлениях для энергетических целей и превращения энергии паровым двигателем в полезную работу.

Использование последних для технологических целей создает беспокойную работу обслуживающему персоналу и большую вероятность аварий, кроме того, требует водоочистительных устройств, удорожающих установку и эксплуатацию, тогда как котлы с большим объемом воды менее прихотливы к питательной воде и эксплуатации.

Структура и свойства котельной стали

Разновидности технического железа представляют собой сплавы железа с углеродом и другими примесями — серой, фосфором, кремнием и марганцем — в обыкновенных сортах и в специальных сортах, кроме того, никелем, вольфрамом, ванадием, хромом, молибденом и даже медью.

Углерод играет важную роль в молекулярном строении и оказывает значительное влияние на механические свойства железа.

Нормальная структура незакаляющегося котельного железа (с точки зрения металлографии — малоуглеродистой доэвтектоидной стали) состоит из растворителя избыточного феррита — зерен почти чистого железа, содержащего в себе несколько сотых процента углерода — перлит-эвтектоид (ложная эвтектика твердого раствора). Перлит является механической смесью — конгломератом отдельных чередующихся пластинок мягкого тягучего почти чистого железа (феррита) и твердого хрупкого карбида железа Fe_3C (цементита).

От количественного соотношения этих двух резко отличающихся друг от друга структурных составляющих (тягучего феррита и хрупкого цементита) зависят все свойства мягкой котельной стали.

По количеству перлита или по сравнению занимаемых им площадей участков можно, не прибегая к химическому анализу, определить с достаточной точностью содержание углерода в железе.

Увеличенное содержание феррита уменьшает временное сопротивление на разрыв и увеличивает относительное удлинение, а увеличение содержания перлита увеличивает временное сопротивление на разрыв и уменьшает относительное удлинение.

По диаграмме плавкости сплавов железа с углеродом (рис. 1) в зависимости от содержания углерода, кроме точки плавления, различают четыре критические точки A_4 , A_3 , A_2 , A_1 (arret — остановка) аллотропических или молекулярных превращений в затвердевших сплавах. При этих превращениях железо переходит четыре различные модификации δ , γ , β , α -железа, имеющие различные физические, химические и механические свойства, причем температуры, соответствующие каждой из этих точек, вследствие гистерезиса не совпадают и лежат при охлаждении ниже, чем при нагревании.

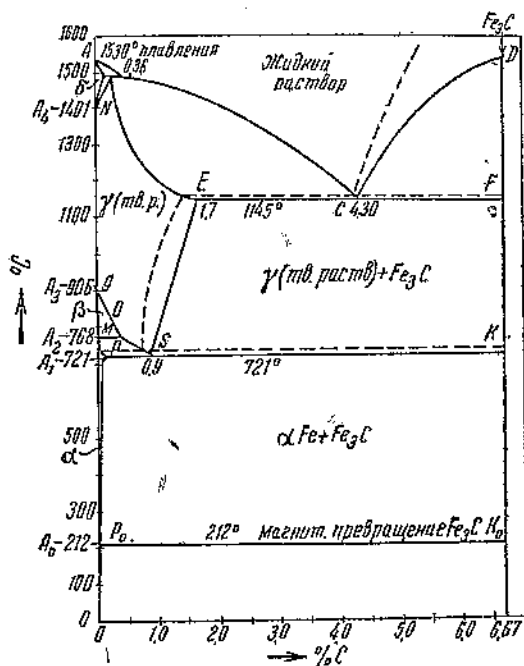


Рис. 1. Диаграмма плавкости сплавов железа с углеродом

По исследованиям рентгенографии существуют аллотропические виды чистого железа: δ -железо выше точки A_4 при 1401°, γ -железо выше точки A_1 при 906° и α -железо ниже точки A_3 , где обозначение «r» соответствует refroidissement — охлаждение, а «с» — chauffage — нагревание.

Модификацию β -железа считают разновидностью α -железа, когда железо при соответствующей точке $A_2 = 768^\circ$ теряет лишь

свои магнитные свойства при нагревании и, наоборот, приобретает при охлаждении, γ -железо также немагнитно, но отличается способностью растворять в себе значительное количество углерода по сравнению с β -железо, растворимость углерода в котором ничтожна.

Структура железа в твердом состоянии, по рентгенографическим исследованиям, является кристаллической кубической системой, отличающейся расположением атомов в кристаллах. Модификации α , β и δ -железа имеют однотипные решетки центрированного куба (атомы расположены по углам и в центре куба) и γ -железа — центрированные грани (атомы расположены в каждом углу куба и в центре каждой грани). Атомы α , β и δ -железа отличаются своим ферромагнетизмом, влияющим и на другие свойства. Поэтому отождествляют α , β и δ рискованию (Тамман).

К критическим точкам относят также остановку при $A_0 = 212^\circ$, связанную с магнитными превращениями, подобными точке A_2 , при которой Fe_3C — цементит, находящийся в твердом растворе α -железа, теряет магнетизм при нагревании.

Из переходов железа одной модификации в другую, сопровождаемых выделением тепла при охлаждении и поглощением его при нагревании, особенно важны следующие.

1. Точка A_3 играет большую роль при отжиге. Выше неё железо и углерод находятся в твердом растворе. В этой точке железо способно при охлаждении выделять из себя углерод, а при нагревании растворять его в себе. Это сопровождается: при охлаждении началом выделения кристаллов из твердого раствора и увеличением объема при $A_3 = 898^\circ$, а при нагревании $A_{32} = 906^\circ$ — переходом кристаллов в твердый раствор и уменьшением объема.

2. Точка A_1 соответствует образованию и выделению перлита при охлаждении и распаду его при нагревании.

При точке A_1 аллотропического превращения не бывает, а происходит лишь выделение тепла при охлаждении и поглощение — при нагревании.

Точка $A_1 = 721^\circ$ отождествляется с точкой рекалесценции «а» (Д. К. Чернова), «при нагревании ниже которой сталь, как бы она тверда ни была и как бы её быстро ни охлаждали, закала не принимает».

При содержании в доэвтектоидной стали (избыточный феррит + перлит) более 0,4% углерода критические точки A_3 и A_2 сливаются. У эвтектоидной стали с содержанием углерода 0,9%, когда феррит и цементит или железо и углерод в твердом растворе взаимно насыщают друг друга, давая однородную структуру, состоящую из зёрен одного эвтектоида — перлита, имеется общая сливающаяся точка A_{3-2-1} . У заэвтектоидной стали (перлит + избыточный цементит), содержащей более 0,9% углерода, критических точек две: — одна общая сливающаяся точка A_{3-2-1} и другая лежащая выше — соответствующая выпадению избыточного

цементита. Последняя точка — выделения цементита и точка A_1 — выделения перлита у чистого железа должны отсутствовать.

Углерод и специальные примеси тормозят переход железа из одной модификации в другую. Основная примесь — углерод — наиболее обуславливает свойство сплавов, а специальные — вносят изменения в строение и отражаются на свойствах стали.

Сера и фосфор являются вредными примесями, сильно ухудшающими сплавы железа и попадающими в них при производстве вместе с рудой и топливом вследствие отсутствия способов для полного избавления от них продукции. Сера побуждает поглощение кислорода, вызывая красноломность и ухудшая свариваемость. Фосфор понижает пластичность и способность переносить удары, делая металлы хладноломким, хотя повышает временное сопротивление. Сера и фосфор придают химическую неоднородность составу, концентрируясь во внутренних зонах слитка, причем фосфор входит в твердый раствор железа, и вредность его повышается с увеличением содержания углерода.

Кремний и марганец являются примесями обыкновенной углеродистой стали и по своему действию на углерод противоположны: марганец увеличивает растворимость углерода в железе, а потому препятствует выделению перлита, кремний, наоборот, — уменьшает эту способность.

Эти элементы добавляются как раскислители для уменьшения образования газовых пузырей в слитке, предотвращают образование и выделение газов. Кроме того Mn нейтрализует вредное действие серы, выделяясь внутри массы феррита более безвредным соединением сернистого марганца (MnS), который не даёт твердого раствора с железом. Особенность Mn в том, что он понижает критические точки и совместно с углеродом суживает интервал между ними. Малоуглеродистая сталь при содержании в ней Mn , хорошо прокованная и прокатанная, обладает высокими механическими свойствами при испытании на разрыв и удар. Кроме того, повышение процентного содержания углерода и марганца ослабляет процесс старения.

Обыкновенные углеродистые нелегированные сорта котельной стали, особенно мягкие, обладают чувствительностью к деформациям в холодном состоянии, склонностью к рекристаллизации и укрупнению зерна и малым сопротивлением разведению, а также разным химическим воздействиям и образованию окалины, а главное, способны понижать предел текучести при высоких температурах. Распадение твердого раствора замедляют специальные примеси: хром, никель, вольфрам, молибден, ванадий, а также повышенное содержание Si и Mn , в присутствии которых твердые коллоидные растворы железа получают более устойчивыми. Все эти примеси по отношению к углероду можно разделить на образующие карбиды: Mn , Cr , W , Mo , V и вступающие в твердый раствор с железом Si и Ni .

На практике встречается большое разнообразие применяемых для котлов высокого давления легированных сталей, которые в зависимости от присаживаемых примесей обладают малой склонностью к старению, высоким пределом текучести при высоких температурах и большой сопротивляемостью к крипу или ползучести.

Свойства металлов зависят от их состава и состояния. Химический анализ даёт представление о составе сплава и показывает количество и природу составляющих его элементов, но не определяет его свойств и не указывает, каким образом эти элементы соединяются между собой. Для определения состояния сплава в зависимости от произведённой над ним обработки прибегают к анализу структуры, который показывает физический состав сплава, устанавливающий связь между свойствами и условиями изготовления и обработки металла, так как последняя, сопровождаемая изменением состояния металла, вызывает перегруппировку частиц, связанную с изменением структуры.

Применяемый при металлографическом исследовании микроскопический метод даёт наглядное представление об однородности материала и о распределении примесей в разных местах сечения.

Этим же методом могут быть выявлены пороки сплавов: пузыри, усадочные раковины, плёны, непровары сварки, посторонние включения, трещины и общий характер структуры.

Таким же путём можно проверить, пробиты ли дыры заклёпок или просверлены, так как места, в которых литое железо было деформировано в холодном состоянии, при травлении макроструктуры специальными реактивами получают особое окрашивание.

Травление имеет большое значение при определении и оценке качества сварных швов.

При отливке слитков и фасонных частей химический состав их в разных местах получается неодинаковым. Эта химическая неоднородность, порождаемая процессом избирательного затвердевания сплавов, называется ликвацией, или сегрегацией.

Ликвация впервые была замечена русскими металлургами Лавровым и Калакуцким в 1866 г. и подтверждена Сорби в 1881 г. Особенную склонность к ликвации, кроме самого углерода, имеют вредные примеси, особенно сера, а затем фосфор.

Микроскопический метод, применяемый при металлографическом исследовании, сводится к рассмотрению структуры образцов сплава после соответствующей подготовки шлифованием, полированием и проявлением. Чтобы определить микроскопическую неоднородность сплава по структурным составляющим и уловить связь между качеством и свойством с его структурой, а также учесть влияние механической обработки и термических операций, необходимо прибегать к исследованию его микроструктуры.

При микроанализе большую роль играет правильное взятие пробы. Весьма важно, чтобы материал образца при взятии пробы и

обработке его не подвергался механическим воздействиям, так как деформации изменяют структуру, и сильному нагреву.

Исследование материала котлов осложняется выбором места взятия пробы.

Кроме нормальных структурных составляющих котельного железа доэвтектоидной стали — феррита и перлита, микроскопом могут быть обнаружены посторонние включения, получившиеся в процессе отливки слитка, и дефекты структуры, образовавшиеся от неправильной механической и термической обработки во время производства металла и изготовления детали котла.

К посторонним включениям относятся: шлаки, сульфиды (сернистое железо, сернистый марганец), окиси железа или кислородные включения, фосфаты, газовые включения, микротрещины и пр., а к дефектам структуры — видманштетова структура, зернистый перлит, структурно свободный цементит, строчечная структура, рекристаллизация и пр.

Котельные материалы должны подвергаться приёмным испытаниям на механические свойства, химический состав и структуру.

Испытание и пробу материала, согласно нормам, производят на разрыв — для характеристики крепости и тягучести, на загиб — для определения пластичности и незакаливаемости металла и на удар динамической нагрузкой — для выявления вязкости (хрупкости) металла.

Помимо этих испытаний, для установления причин повреждений, аварий, а также пригодности материала старых котлов для дальнейшей их службы, прибегают к определению твёрдости по Бриггеллю, металлографическим исследованиям на макро- и микроструктуру и химическому анализу.

При этом нужно иметь в виду, что мерой пластичности служат данные как относительного удлинения, так и относительного сужения образца при разрыве. Проба загиба характеризует также состояние поверхностных слоёв металла; о хрупкости его судят по сопротивлению на удар и по способности вытягиваться при статическом растяжении до разрыва. Считают, что при низкой пластичности получается и низкое сопротивление на удар, однако при высокой пластичности металл не всегда даёт высокое сопротивление на удар. Хорошее удлинение не гарантирует высокой ударной вязкости. Удлинение и ударная вязкость — величины, не зависящие одна от другой.

Поведение и механические свойства котельного материала при переменной нагрузке и высоких температурах иные, чем при комнатной температуре.

Результаты испытания прочности на разрыв при повышенной температуре зависят от скорости нагрева, длительности выдержки и скорости растяжения; поэтому временное сопротивление и предел текучести получаются условными. Независимо от этого на них же оказывают влияние старение, синеломкость и рекристаллизация, первопричина которых лежит в неправильной обработке при изго-

товлении и ремонте котлов, а также эволюционные процессы: усталость, сфероидизация и ползучесть, зависящие также от напряжений, температуры и времени.

Испытания материала под действием постоянной нагрузки также недостаточно характеризуют его сопротивляемость переменным нагрузкам.

Под влиянием температуры временное сопротивление котельной малоуглеродистой стали, слегка понижаясь при слабых нагревах, вновь увеличивается до максимума при температуре около 300° . Максимум этот достигается при тем более низкой температуре, чем меньше сталь содержит углерода. Соответственно тем же температурам снижается удлинение и поперечное сжатие, которые, достигнув минимума в пределах 200° , снова начинают возрастать.

Пределы упругости и текучести плавно снижаются, причём определение последнего затруднено, так как площадка текучести на диаграммах растяжения становится менее заметной и, наконец, при $400\text{--}500^{\circ}$ совсем исчезает. Что касается ударной вязкости, то она, достигая максимума при 100° , мало изменяется в сторону снижения.

Установленное опытами явление уменьшения прочности котельных материалов от длительности испытания не имело большого значения; так как это влияние становится заметным лишь при температурах, превышающих 300° , т. е. в области температур, не представляющих особого опасения при обычных давлениях пара.

С повышением рабочего давления и перегрева пара, доходящего до 500° , вызывающих повышение температуры стенок котла, происходят резкие изменения в поведении котельного материала. Поэтому применение углеродистой стали на изготовление котельных листов и барабанов ограничивается давлением до 40 атм., а труб кипяточных и пароперегревательных — до 400°C .

Для котлов высоких давлений и перегрева пара применяют легированные — теплоустойчивые и жароупорные стали, не восприимчивые к старению и крипу, и выпускают барабаны без заклёпочных швов, изготовляемые путём сварки иликовки.

Вообще клёпка для изготовления барабанов на высокое давление неприменима вследствие трудности склёпывания толстых листов. Барабаны на повышенное давление изготавливаются со сварными швами или цельнокованные с приклёпанными и приваренными днищами. Для высоких давлений отдаётся предпочтение цельнокованным барабанам с обжатými сферическими днищами.

При обычной работе паровых котлов материал стенок подвергается не спокойной, а переменной нагрузке с повторными колебаниями. Такие колебания напряжений в стенках котла вызываются возрастанием и понижением давления при пуске и остановке его, а также при непостоянном давлении во время работы. Эти колебания напряжений односторонни, т. е. меняются от нуля до некоторой наибольшей величины или колеблются между двумя предельными величинами в одну сторону от нуля.

При эксплуатации котлов возможны колебания и в обе стороны от нуля вследствие температурных влияний, оказываемых, с одной стороны, горячими газами, а с другой — питательной водой.

Материал, подверженный через определённые промежутки времени повторным переменным усилиям, меняющим своё направление и величину, разрушается при нагрузке, лежащей ниже временного сопротивления, и даже ниже предела текучести. Такое явление, получающееся от повторяющейся знакопеременной нагрузки, было замечено Велером ещё в 1858 г. и было названо «усталостью».

При переменных напряжениях, вызываемых повторными нагрузками, величина переменной нагрузки, разрушающей материал, зависит от числа повторных колебаний. Поэтому чем меньше напряжение, тем большее число постоянных усилий выдерживает материал, и, наоборот, чем выше напряжение, тем меньшее число колебаний нагрузки ведёт к разрушению его. Максимальное напряжение, при котором переменная нагрузка может меняться неограниченное число раз, называется пределом усталости. Этим пределом принято считать максимальное напряжение, при котором материал выдерживает 10^7 перемен нагрузки без разрушения. Падение предела усталости меньше предела текучести и временного сопротивления.

Изучение поведения материала установило влияние длительности нагрузки на прочность металла. Это свойство его, характеризующее прочность при длительно действующей нагрузке, на которое не обращалось внимания, выявилось в результате высоких температур и больших механических нагрузок; оно названо ползучестью, или крипом.

Явление крипа сводится к медленному остающемуся увеличению размеров деталей при высоких температурах под действием длительной нагрузки. Такое увеличение размеров в обычных условиях мало, но с повышением температур и давлений скорость крипа резко увеличивается. Это приводит к тому, что обычная мягкая малоуглеродистая сталь, с которой приходилось иметь дело при изготовлении котлов обычных давлений, не превышающих 22—25 атм, оказывается малоприменимой для котлов высоких давлений и перегрева пара. Такая сталь уступает место специальным легированным сталям, значительно менее подверженным ползучести, а также явлениям старения, рекристаллизации, у которых временное сопротивление и предел текучести снижаются лишь при более высоких температурах, чем у малоуглеродистой стали. Этому свойству ползучести способствуют рекристаллизация и сфероидизация, усиливающие одновременно и старение.

Изменение свойств стали, происходящее под влиянием механических усилий и деформаций, вызывается взаимными смещениями и сдвигами частиц, что, в свою очередь, связано с изменением структуры и формы зёрен. Эти сдвиги можно наблюдать на микрошлифах в виде ряда линий, называемых линиями скольжения или

сдвигов, число которых увеличивается с увеличением деформации, причём они становятся спутанными, а зерно феррита и включения перлита вытянутыми, постепенно приобретающими волокнистое строение.

Деформирование стали в холодном состоянии влечёт за собой повышение предела текучести и временного сопротивления и уменьшение удлинения при разрыве. Изменения эти, однако, не отличаются устойчивостью.

Качество материала, деформированного в холодном состоянии, с течением времени, при вылеживании его, ухудшается, что установлено на основании результатов испытания на изгиб Стромайером в 1907 г. и названо «старением».

Дальнейшие исследования показали: 1) кроме вылеживания старение деформированной стали ускоряет нагрев до 200°; 2) более подвержена старению малоуглеродистая сталь. Влияние старения сильнее всего отражается на ударной вязкости, вызывая понижение её, причём увеличение хрупкости у мягких сортов более значительное, чем у твёрдых.

Испытание на изгиб пробных брусков с поверхностной насечкой зубилом или со смятой ударами поверхностью (одних немедленно после деформирования, а других спустя некоторое время или после предварительного нагревания) подтверждает явление старения.

Те же последствия в смысле повышения хрупкости и снижения способности к деформированию влечёт за собой явление синеломкости, при котором деформированное железо при синем нагреве в пределах 200—300° приобретает хрупкость и способность давать при обработке трещины.

При синеломкости хрупкость проявляется не только при нагреве до температуры синего нагрева. Она достигает еще больших размеров при нормальной температуре после деформирования при синем нагреве точно так же, как от деформации при нормальной температуре с последующим нагревом до синего нагрева, как при старении. Это указывает на необходимость осторожной очистки от накипи и налёта железа с остаточными деформациями, которые при нагревании могут привести к старению и синеломкости.

При испытании на загиб старых котельных листов с насечённой или смятой поверхностью, полученной при очистке котлов от накипи, получают изломы. По удалении насечки или смятого слоя ошпоровкой они сгибаются без признаков излома.

Нормальная структурная составляющая мягкой стали — пластинчатый перлит, состоящий из чередующихся пластинок феррита и цементита, неустойчив.

Под влиянием длительного нагрева или медленного охлаждения при температурах порядка критической точки A_1 и близких к ней возможны структурные изменения. Менее устойчивый, но более надёжный в смысле механической сопротивляемости пластинчатый перлит переходит в более стабильную, но обладающую меньшей сопротивляемостью форму зернистого перлита, вследствие коалес-

цении пластинок цементита в шаровидные скопления, почему такой процесс округления и получил название сферондизации.

Структурное изменение, сопровождаемое укрупнением и ростом зерна и возникающее при нагревах ниже критических температур в предварительно деформированной котельной стали, носит название рекристаллизации. Такой процесс, стремящийся уничтожить строение и искажение зерна, произведённое деформацией, впервые заметил Стэд в 1898 г.

Таким образом, наклёп и пластическая деформация за предел текучести упрочняют металл, а нагрев до температуры рекристаллизации $500-350^{\circ}$ разупрочняют.

Рекристаллизация наблюдается у малоуглеродистой стали в большей степени, так как углерод противодействует при кристаллизации росту зерна. Рекристаллизация по характеру тесно связана и сопровождается старением и синеломкостью.

К эволюционным процессам изменения механических свойств относится также дисперсионное твердение, сопровождаемое упрочнением, т. е. повышением твёрдости и прочности и понижением вязкости и пластичности при длительном вылёживании или кратковременном нагреве.

Причина дисперсионного твердения заключается в том, что предельная растворимость в основном металле примесей зависит от температуры, увеличиваясь с повышением и уменьшаясь с понижением её.

У углеродистой стали по диаграмме плавкости растворимость углерода (Fe_3C — цементита) в твёрдом растворе α -железа с повышением температуры от 20° до точки A_1 изменяется от 0,006% до 0,04% (рис. 2).

При особенно быстром охлаждении у котельного материала имеется возможность получить перенасыщение твёрдого раствора α -железа, который стремится с течением времени уменьшить его вследствие длительного вылёживания или нагрева и вызвать твердение и хрупкость, как предполагают, вследствие перегруппировки атомов углерода в атомно-кристаллической решётке и мелкодисперсионных выпадений цементита из раствора. Можно полагать, что родственные эволюционные процессы: старение, синеломкость и дисперсионное твердение, — явления одного порядка.

От неправильного нагрева при термической обработке случаются перегрев и пережог котельного материала.

Длительный перегрев при высокой температуре, близкой к расплавлению, сопровождается ростом зерна и получением струк-



Рис. 2. Растворимость углерода в α -железе

туры Видманштета, названной так по имени учёного, впервые обнаружившего её в железе метеоритов. Феррит в этой структуре выделяется и располагается по определённым направлениям, образуя геометрические фигуры треугольников и четырёхугольников.

Такая крупная клетчатая структура с ослабленной связью между зёрнами и уменьшённой прочностью перегретого металла очень хрупка и сминается. Исправить и уничтожить следы такой структуры можно лишь отжигом с продолжительной выдержкой выше точки A_3 , чтобы все частицы разошлись в твёрдом растворе.

От перегрева нужно отличать пережог, когда, кроме образования крупного зерна, произошли ещё химические изменения в составе и образовались по границам зёрен неметаллические включения от окисления поверхности зёрен проникшим кислородом воздуха.

Такой пережжённый металл обладает малой прочностью в отношении длительных нагрузок и значительной хрупкостью. Последствия пережога не могут быть устранены и исправлены отжигом, можно лишь улучшить структуру усиленной ковкой.

Неправильное медленное охлаждение котельной стали с малым содержанием углерода, менее 0,2%, и марганца, ниже 0,6%, в интервале критических точек A_3 — A_1 и особенно медленный переход через точку A_1 вызывает выделения структурно свободного цементита, на что впервые указал и объяснил условия его образования Стэд в 1904 г.

Образование структурно свободного цементита происходит после выделения перлита из твёрдого раствора вследствие слияния отдельных пластинок цементита в перлите в более крупные массы, в то время как феррит перлита стремится слиться с общей массой феррита.

Такая структурная составляющая, не соответствующая доэвтектоидной стали, ослабляет межкуристаллическую спаянность и повышает хрупкость.

При рассмотрении микроснимков по характеру и форме встречающихся выделений структурно свободного цементита в зависимости от распада перлита можно установить постепенность и последовательность развития стадий его образования. Первоначальные стадии — почечный цементит в виде точек и строчечный цементит в виде прерывистых нитей и цепочек, расположенных по стыкам зерен феррита. Затем идут резко выраженные, редко встречаемые формы более крупных скоплений цементита в виде отдельных ключев у границ перлита и, наконец, в виде окаймляющих опушек и замкнутых сеток вокруг зерен.

Статические механические испытания не улавливают влияния структурно свободного цементита на снижение механических свойств стали, особенно начальных стадий. По литературным данным, самая вредная форма сеток, окаймляющих зёрна, вызывает падение ударной вязкости и повышение чувствительности к старению.

Сферокдизация пластинчатого перлита в зернистый возможна в стали независимо от содержания углерода, тогда как последующие стадии развития структурно свободного цементита могут получаться лишь в стали с малым содержанием углерода и марганца. Поэтому зернистый перлит нельзя считать первоначальной стадией образования структурно свободного цементита.

ПРИЧИНЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

„Vera scire est per causas scire“¹

Причины повреждения паровых котлов зависят от свойств материала, обработки его при производстве и изготовлении или при ремонте котла, от конструкции и условий эксплуатации.

Обнаруживаемые на практике повреждения стенок паровых котлов обязаны своим происхождением недоброкачественности материала, порокам структуры, недостаткам изготовления, нецелесообразности и жесткости конструкции, неправильностям установки, нарушению циркуляции, ненормальным условиям работы и плохому обслуживанию.

Эти повреждения котлов, снижающие прочность и безопасность котлов, наблюдаются в виде:

1) наружных и внутренних разъеданий, ржавлений и химических изменений материала от воздействия воды и газов на стенки, а также при течи швов, пропускании соединений и при сырости обмуровки,

2) разъединения стенок, трещин, разрывов и надрывов в местах перенапряжения и деформации, а также вследствие неравномерного прогрева и быстрого охлаждения стенок,

3) изменений формы, выпучин и отдулин от застоя тепла и перегрева стенок при нарушении циркуляции и отвода тепла водой,

4) расслоений, плён, непроваров и изменений структуры материала, получающихся от неправильной механической и термической обработки материала при производстве и изготовлении котлов.

Не входя в рассмотрение грубых нарушений эксплуатации, влекущих за собой крупные аварии котлов, причины обнаруживаемых повреждений и разных дефектов можно разделить на обычные эксплуатационные, получаемые во время службы котла, и природные, образующиеся при производстве самого материала и в процессе изготовления и сборки котла.

Эксплуатационные повреждения в большинстве случаев по своей наглядности и очевидности не вызывают сомнений в их происхождении.

Природные недостатки, а особенно качество и структурные изменения материала, не всегда бесспорны и нередко требуют дополнительных доказательств, исследований и испытаний материала.

¹ Хорошо понимать — значит знать причину.

Наибольшие изменения структуры, наклёп и остающиеся вредные напряжения металл получает в процессе сборки котла (во время операций: правки, разметки, загиба листов, отбортовки, фланцевания, резки, пробивки дыр, пригонки отдельных элементов, сборки, оттяжки лацканов, клёпки, чеканки, развальцовки, сварки и др.).

Все операции по сборке котла, сопряжённые с деформированием металла, наклёпом и изменением структуры металла при нагревах, усиливают старение и уменьшают разрывное усилие, предел текучести и ударную вязкость, которые и без того снижаются у углеродистой стали в пределах рабочих температур стенок котла. Поэтому к сборке и ремонту котлов нужно подходить с большой тщательностью и осторожностью. Особенное значение должно придаваться нагреванию листов во время их сборки. Отбортовку, загибание и обработку листов и элементов котла следует вести при правильном нагреве, не ниже красного каления. Местные, частичные и неравномерные нагревы не следует допускать во избежание образования вредных напряжений, получения различной мозаичной структуры в разных частях, не поддающихся исследованию, и появления преждевременного, до работы котла, старения и усталости металла.

Обработка железа при температурах около 300° при так называемом синем нагреве безусловно недопустима, так как при такой температуре структура резко изменяется, и железо теряет свою прочность, становится хрупким, очень чувствительным к ударам и даёт трещины.

Недопустимы также насильственная пригонка одна к другой неправильной формы поверхностей, всякая наклёпка и обработка железа в холодном состоянии, при малом нагреве и остывании ниже красного каления, а также ковка, пробивка дыр и тому подобные изменения формы, так как это вызывает вредные напряжения, придаёт хрупкость листам и понижает сопротивляемость. Ответственные части, в целях восстановления нормальной структуры материала, после обработки должны подвергаться правильному отжигу до температуры немного выше точки A_3 с выдержкой, чтобы старая структура перешла в твёрдый раствор. При этом нужно иметь в виду, что на качество котельной стали имеет громадное влияние скорость охлаждения, которое должно быть быстрым в интервале критических точек A_3 — A_1 и медленным ниже точки A_1 .

Загибы и отбортовки должны делаться с возможно большим радиусом закруглений: чем меньше их радиус, тем более возможным становится образование трещин и надрывов вследствие возникновения в материале вредных напряжений. Образованию надрывов особенно способствуют складки и морщины, получаемые при штамповке и отбортовке.

Швы рекомендуется делать с двумя накладками, причём следует избегать швов внахлёстку, при которых получается некруглое поперечное сечение барабанов, отчего в швах возникают напряжения

на изгиб. При толщине склёпываемых листов более 15 мм продольные швы внахлёстку не допускаются.

Накладки изготавливаются из того же материала, что и котельные листы, причём продольные накладки должны быть согнуты жолобообразно, с поперечным расположением волокон.

Выполнение хорошей клёпки обуславливается безупречной сборкой и пригонкой листов, а также накладок, с точным совпадением дыр.

Все заклёпки нужно ставить горячими с нагревом по всей длине для обсадки с обеих сторон. Прежде заклёпочные соединения рассчитывались лишь на срез, но так как заклёпки, поставленные в нагретом состоянии, при охлаждении сжимаются и могут не заполнить заклёпочного отверстия и не прилегать к стенкам дыры с усилием, то ставить условие, чтобы заклёпки работали лишь на срез, нельзя.

Заклёпочное соединение сопротивляется вследствие сокращения стержня заклёпки, благодаря чему при охлаждении листы плотно прижимаются один к другому. Получается значительное трение, усиливаемое тем, что шероховатости листов сильно вдавливаются одна в другую.

Если повреждения нельзя предотвратить, то их можно избежать частично принятием во-время соответствующих мер и локализовать вредное влияние правильных методов обслуживания, чтобы не довести котёл до опасного состояния.

По общему характеру конструкций и обнаруживаемым повреждениям выделяются котлы: 1) с огневыми коробками (трещины по загибам топочных листов и у связей), 2) с дымогарными трубками (трещины в решетках), 3) батарейные, особенно котлы Менье (отдушины в кипятильниках, искривления барабанов), 4) жаротрубные (надрывы по отбортовкам днищ и царг жаровых труб, следы расслоений и непроваров по сварным швам царг), 5) горизонтально-водотрубные с цельными камерами (трещины и расслоения по сварным швам, особенно передних камер, а у клёпанных—проспуск заклёпочных швов), 6) вертикально-водотрубные с прямыми трубками (трещины на ступенчатой плите, а у многобарабанных кроме того трещины на вырезах для соединительных патрубков, особенно нижних барабанов вследствие жесткости от неравномерного прогрева воды при растопке), 7) стоячие (наружные разъедания по соединению лиза корпуса с тонкой и внутренние трубы, проходящие через паровое пространство).

НЕДОБРОКАЧЕСТВЕННОСТЬ МАТЕРИАЛА И НЕДОСТАТКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Для изготовления паровых котлов должен применяться только испытанный материал, соответствующий нормам и своему назначению.

Материал должен обладать хорошими механическими качествами, хорошими химическими свойствами и однородной структурой, дающими основание рассчитывать на неизменяемость во время изготовления и службы. Иными словами, должен обладать прочностью, чтобы оказывать сопротивление давлению и температуре; пластичностью, чтобы выдерживать обработку; упругостью, чтобы оказывать сопротивление действию напряжений от неравномерности нагрева, и стойкостью против химического влияния питательной воды и продуктов горения.

Характеристики прочности, определяемые статическими испытаниями при обыкновенной температуре, недостаточно характеризуют материал, работающий при знакопеременных нагрузках, высоких температурах и длительных напряжениях.

При знакопеременной нагрузке может наблюдаться специфическое свойство — усталость металла, разрушение от которой протекает иначе, чем при статической нагрузке; поэтому характеристики того и другого не зависят одна от другой и не имеют связи между собой.

Материал, подверженный повторным переменным нагрузкам, имеющим место и в котлах, разрушается без заметных деформаций. Излом усталости имеет наружную зону от постепенного разрушения и внутреннюю, сломавшуюся мгновенно, когда сечение приняло размеры, при которых нарушалась прочность. Поэтому состояние поверхности и повреждение её надрывами, насечками, особенно острыми, оказывает большое влияние на снижение предела усталости. Причиной разрушения под действием переменной нагрузки считают местные перенапряжения отдельных зёрен.

Исследованиями установлено, что при длительных переменных нагрузках и повышенной температуре падение предела усталости меньше пределов текучести и временного сопротивления, а потому на усталость не ведётся расчётов. Для мягкой стали наклёп повышает предел усталости, что, повидимому, происходит за счёт старения.

Предел усталости зависит также от вида напряжений. По данным лаборатории Крупна, если принять сопротивляемость усталости при изгибе за единицу, то сопротивление усталости при растяжении и сжатии будет равно 0,7, а при кручении — 0,58 сопротивления при изгибе.

Поведение и механические свойства котельного материала под напряжением при высоких температурах резко меняются. Длительная работа в этих условиях вызывает ползучесть, или крип — остаточную деформацию, постепенно и медленно увеличивающуюся при длительном нагреве, особенно с повышением температуры под действием постоянного напряжения, меньшего, однако, по величине, чем соответствующее разрушение металла.

Ползучесть нужно рассматривать как пластическую деформацию, протекающую в условиях длительного приложения нагрузки при повышенной температуре. Эта деформация начинается лишь с

некоторой температуры, различной для разных сортов легированной и нелегированной стали. Ползучесть котельной стали особенно заметно сказывается при температурах выше 330° , а потому крип имеет особо большое значение и отражается на материале котлов высокого давления. Для нелегированных сталей предел ползучести около $300-350^{\circ}$, причём лежит он выше предела текучести. Испытания на ползучесть очень длительны и дороги, а оценка сопротивления ползучести очень затруднительна ввиду отсутствия договорённости и установленности значений.

Факторами, усиливающими ползучесть, являются: наклёп, создающий упрочнение от пластической деформации, и рекристаллизация, вызывающая разупрочнение при нагревании. Кроме того, на скорость ползучести влияют и другие факторы, как усиливающие, так и ослабляющие её: сфероидизация при длительном нагреве, старение от действия наклёпа и нагрева и дисперсионное твердение от устранения пресыщённости твёрдого раствора.

Существенное снижение прочности котельного железа может происходить при температуре выше 400° вследствие крипа, сопровождаемого рекристаллизацией и сфероидизацией. Однако таких температур при нормальной работе стенки котла старых обычных конструкций и давлений пара не бывает, а для котлов высоких давлений употребляются особые легированные крипоустойчивые стали.

У углеродистой стали сфероидизация не сопровождается существенными изменениями свойств. Большая скорость крипа, особенно при наклёпе неотожженного металла, имеет значение в котлах высоких давлений и температур перегрева пара и главным образом трубок перегревателей, работающих при температурах $400-500^{\circ}$.

Из всего сказанного выше вытекает, что целесообразнее всего отдавать предпочтение твёрдым сортам стали перед мягкими¹.

Неправильная обработка вызывает у мягкой углеродистой стали нежелательные изменения свойств и структуры в большей степени, чем у твёрдой. Сталь с более высоким содержанием углерода и с большим временным сопротивлением менее чувствительна к деформации в холодном состоянии с последующими нагревами. Более значительная склонность к крипу, старению, рекристаллизации и, наконец, к возможности образования структурно свободного цементита в малоуглеродистой стали также не говорит об её преимуществе перед более твёрдыми сортами стали.

Применение более мягкого и вязкого железа в старых котлах, повидимому, оправдывалось лишь возможностью более длительного деформирования без разрыва образовавшихся отдулин припуске воды.

Пороки и недостатки, зависящие от качества котельного материала и могущие послужить причиной аварий, как-то: плёны, свищи, непровары, расслоения, закаты, прослойки, трещины, посто-

¹ К. Бах Z. V. D I., 1912, стр. 360.

ронные включения, дефекты структуры от неправильной термической обработки и возможных при прокатке холодный наклёп от недостаточности нагрева, вызывающие хрупкость и вредные напряжения, отрицательно влияющие на прочность, не всегда могут быть выявлены.

Менее устойчивыми, вследствие неоднородности состава металла, являются места, более богатые содержанием segregирующих вредных примесей — серы, фосфора, а также окислов. Неизбежный неравномерный нагрев стенок котла способствует образованию как трещин и надрывов, так и разъеданию стенок в соприкосновении с котловой водой и газами от химического воздействия и электролиза.

Особенно опасными являются плёны и непровары, находящиеся в топочных листах, так как они вызывают перегрев металла и образование односторонних отдулин и трещин. Опасны также плёны, расположенные под углом и оканчивающиеся на поверхности листа в виде заусенцев, дающих расслоения; плёны же, расположенные глубоко и параллельно поверхности, если они не подвергаются непосредственному действию огня, часто остаются незамеченными и не приносят вреда.

Котельный материал недеформированный или правильно отожженный обладает большой химической стойкостью и меньшей чувствительностью к разъеданию и образованию трещин.

Большое значение имеет появление хрупкости, вредных напряжений и изменений структуры у деформированных в холодном состоянии котельных материалов, подвергающихся повторным нагрузкам и повышенным температурам во время службы, а также обуславливающих старение, усталость, рекристаллизацию, крип и возможность дисперсионного твердения.

Холодная обработка, или так называемый наклёп, пока деформация имеет упругий характер, не меняет структуры и свойств, при переходе же за предел текучести получается остаточная деформация. По мере увеличения пластической деформации при соответствующем увеличении механического усилия напряжение в металле увеличивается. Металл становится как бы крепче, но способность его подвергаться дальнейшему деформированию постепенно падает и совершенно утрачивается при разрыве. Пластическая деформация с момента её возникновения, вызывая повышение крепости, а также твёрдости при увеличении хрупкости и уменьшении пластичности, сопровождается изменением как свойств, так и структуры.

Самостоятельными процессами, происходящими в предварительно деформированной мягкой стали и стремящимися привести структуру к равновесию, объясняются старение, синеломкость, дисперсионное твердение и рекристаллизация. Кроме этих явлений, первопричина которых лежит в наклёпе железа или в неправильной обработке материала при изготовлении котла или даже в наклёпе во время службы котла, могут происходить также при

эксплоатации родственные им явления, обуславливаемые наличием переменных нагрузок и напряжений при повышенных температурах, а именно усталость, ползучесть и сфероидизация — процессы, также связанные с временем.

В местах, деформированных в холодном состоянии за пределом текучести, возможно старение. Этот процесс характеризуется прогрессирующим снижением ударной вязкости с течением времени при обычной температуре или при подогреве до 200° как и родственное старению явление синеломкости, при которой хрупкость проявляется не только при самом нагреве до синего цвета побежалости, но и при обычной температуре, если металл был наклепан при этом нагреве.

Явление старения, повидимому, нужно отнести за счёт дисперсных выделений, так как в результате получается повышение твёрдости и уменьшение ударной вязкости. Можно полагать, что с течением времени происходит распад твёрдых растворов углерода, кислорода и азота в α -железе. Всего вероятнее, что при соответствующем проведении раскисления в стали во время плавки этих выпадающих частиц окислов можно получать нестареющее железо (марки Jzett) Крупна. Материал, подверженный старению, также плохо противостоит воздействию щелочей и при этом становится хрупким. Мягкая низкоуглеродистая сталь сильнее подвержена старению.

Кроме старения, аналогичное по характеру изменение механических свойств может происходить под влиянием дисперсионного твердения. Такое изменение происходит вследствие уменьшения растворимости в α -Fe углерода при низких температурах по сравнению с более высокими. После быстрого охлаждения с течением времени происходит выпадение карбидов (Fe_3C), и металл приобретает повышенную твёрдость и пониженную ударную вязкость.

Как известно из диаграммы плавокости железо-углеродистых сплавов, растворимость углерода (Fe_3C) в твёрдом растворе α -железа изменяется от 0,006% C при 20° до 0,04% C при точке А₁. Такое изменение предельной растворимости с температурой обуславливает возможность получения перенасыщения твёрдого раствора α -железа при быстром охлаждении и стремление уменьшить пресыщённость при длительном вылёживании или нагреве. Вследствие этого, как предполагают Тамман и Мерик, получается упрочнение металла, происходящее от выпадения из пресыщенного твёрдого раствора α -железа мелкодисперсных выделений Fe_3C . Последние, искажая решётки, засоряют плоскости скольжения и тем затрудняют возможность сдвига, вследствие чего предел текучести повышается.

Такое упрочнение не является устойчивым, так как выпадение из твёрдого раствора мелкодисперсных частиц избыточного компонента, обуславливающих повышение твердости, достигает своего максимума при определенной температуре для разных сортов стали. С повышением температуры за этот предел следует понижение

твёрдости, повидимому, вследствие коагуляции выпавших частиц в более крупные скопления, менее препятствующие скольжению.

По сути и характеру явлений старение и дисперсионное твердение можно отождествлять между собой и дисперсионное твердение считать одной из причин старения. В процессе распада из пересыщенного твёрдого раствора железа с углеродом выделяются дисперсные частицы цементита — карбиды, которые деформируют в местах выделения пространственные решётки α -железа. Растворенная окись железа (FeO) и нитриды, также выпадая из раствора в виде микроскопических частиц, уменьшают вязкость и пластичность стали и упрочняют ее.

Малую склонность к старению и большую устойчивость к коррозии стали «Jsett» можно объяснить ее чистотой, отсутствием вредных примесей и малым содержанием кислорода. Это качество обуславливается особенностями изготовления и тщательностью раскисления при плавке.

Способность к дисперсионному твердению наиболее свойственна легированным сталям из-за присутствия в них специальных примесей; причем для каждого сорта существует определенная температура, при которой это явление достигает максимума.

При сборке котлов не следует допускать быстрого охлаждения частей котла, которые после нагревов и обработки необходимо подвергнуть правильному отжигу, гарантирующему устойчивость структуры.

Наибольшее изменение структуры, наклеп и остающиеся вредные напряжения материал получает во время процесса изготовления котла. Особое значение при операциях сборки котла должно придаваться правильному нагреву. Местные, частичные, неравномерные нагревы вызывают вредные напряжения и создают мозаичную, разнообразную в разных частях структуру, не поддающуюся исследованию. От обработки и деформирования при недостаточном сильном нагреве сталь становится очень чувствительной к ударам и приобретает хрупкость и способность давать трещины. Такая хрупкость является следствием понижения способности к изменениям формы и деформациям при сильном нагреве и требует большего напряжения, чем при более высокой или более низкой температуре.

Поэтому все ответственные части и элементы котла после обработки должны подвергаться правильному отжигу в целях: а) восстановления нормальной структуры материала и исправления деформированной, б) получения мелкозернистого строения, более надежного, чем крупнозернистое, и в) уничтожения вредных напряжений, внесенных механической обработкой при недостаточном нагреве. При этом нужно иметь в виду, что температура нагрева и скорость охлаждения оказывают большое влияние на структуру и качество железа.

Правильный отжиг состоит 1) в равномерном нагреве немного выше критической точки A_3 , зависящей от содержания углерода; при этой точке углеродистая структурная составляющая — перлит

ли
т
с
с
р
те
н
щ
бс
ки

ки
ст
гр
гал

тал

ил
бо
Из
ки
лес
шо
ни
уд
хан
ств
как

вал
с в

виз
тал
кл
пос
обр
тре
и
ним
шин
жен
так
репа
пред
и
недо

3 в.

переходит в твёрдый раствор γ -железа; 2) в выдержке после нагрева до этой температуры, в течение различного времени, в зависимости от массы металла, в целях уничтожения старой существующей структуры, чтобы не получить неоднородности зерна в разных местах; 3) в быстром охлаждении в интервале критических температур точек A_3 — A_1 , особенно при прохождении через последнюю критическую точку во избежание получения несоответствующей структурной составляющей в мягкой стали — структурно свободного цементита, а затем в медленном охлаждении ниже точки A_1 во избежание возникновения вредных напряжений в металле.

Нельзя допускать большого перегрева, выше критической точки A_3 , чтобы не получить неудовлетворительной крупнозернистой структуры ферритовых скоплений с понижением качества. Перегрев будет тем опаснее, чем больше содержание углерода и марганца.

Низкий нагрев, ниже точки A_3 , хотя бы и продолжительный, также недопустим.

В результате недогрева старая структура не совсем исчезнет или останется такой, какой была до отжига. Следовательно, выбор правильной температуры отжига имеет громадное значение. Излишняя продолжительность выдержки выше критической точки A_3 тоже может понизить механические свойства и вызывать коалесценцию феррита. Хорошо отожженное железо обладает большой химической стойкостью и меньшей чувствительностью к влиянию разведения питательной водой. Поэтому отжигу должно уделяться особое внимание. Таким образом, правильная горячая механическая обработка и отжиг имеют большое значение для качества и структуры котельного материала. Правильностью отжига, как показывает практика исследований, часто пренебрегают.

Применяемые при изготовлении котлов клёпка, чеканка, развальцовка и сварка также связаны с остаточными деформациями и с возникновением вредных напряжений.

Клёпка должна осуществляться лишь при точной приладке кризисных склёпываемых поверхностей листов и элементов, при тщательной обработке кромок, правильной разбивке и соединении заклёпочных дыр, которые должны сверлиться, по возможности, после загиба и пригонки листов. Кромки должны строгаться или обрубаться, причём без зарубок во избежание появления в будущем трещин.

При ручной клёпке швы получаются менее плотными и с меньшим сопротивлением скольжению, т. е. менее прочными. При машинной клёпке необходимо избегать чрезмерных давлений на стержень заклёпки, так как в противном случае материал как заклёпки, так и склёпываемых листов под головками деформируется, приобретает хрупкость и получает вредные напряжения, переходящие за предел текучести.

Кроме сказанного, клёпанные швы обладают свойственными им недостатками. Трудно допустить, что склёпываемые края листов в

заклёпочном соединении плотно прилегают друг к другу по всей поверхности, а потому и считать, что сопротивление скольжению распределяется равномерно. Более плотное прилегание и наибольшее трение создаются на кольцеобразных участках вокруг стержней заклёпок, под половками, причём они постепенно уменьшаются по мере удаления к наружной окружности колец. При такой неравномерной передаче усилий наибольшие напряжения будут возникать у кромок заклёпочных отверстий. Эти напряжения будут тем больше, чем меньше площади соприкасающихся кольцевых площадок, а по направлению толщины листов величина их будет уменьшаться по мере углубления от плоскостей соприкосновения.

Неизбежный неравномерный нагрев стенок котла и неодинаковые тепловые деформации могут нарушать плотность заклёпочных швов и не гарантируют герметичности соединений труб вальцовкой.

Неизбежность чеканки и развальцовки труб для придания плотности швам и соединениям труб с решётками во время изготовления и службы котлов даёт более значительные остаточные деформации, нежели все другие операции сборки, применяемые в котельном деле. Плотность при чеканке достигается путём осаживания кромки верхнего листа к нижнему.

При чеканке материал сильно сминается, отчего могут получаться трещины, плохая же, неумелая чеканка даже, наоборот, растрескивает швы и не устраняет пропаривания и течи, что вызывает образование постепенно увеличивающихся разъеданий и бороздок истирания паром.

Существуют два способа чеканки: обычный — путём осаживания края кромки верхнего листа и американский, когда это осаживание производят путём образования полукруглой канавки вдоль кромки, с последующими затем уплотнением и подбиранием осажженного металла при обоих способах.

Американская чеканка имеет больше преимуществ перед обычной, а именно: полукруглая канавка менее ослабляет прочность шва и не повреждает нижнего листа, а также не получается зарубок и забоин листа, которых трудно избежать при обычной чеканке, шов же уплотняется на большую глубину.

При чеканке обычным способом можно загнать под лист заусенцы, отчего могут получаться неплотности, требующие перечеканки или даже обрубки кромки, что в данном случае более поможет делу.

Развальцовка, так же как и чеканка, имеет широкое применение при изготовлении и во время службы котлов.

Операция развальцовки, сводящаяся к расширению и раздаче материала конца трубы до плотного соприкосновения со стенкой трубной решётки, под действием больших местных давлений сопряжена с деформированием металла даже за предел текучести.

Для большего сопротивления выравниванию трубы и герметичности соединения в отверстия решётки иногда делают поперечные концентрические бороздки, в которые металл трубы впрессовы-

вается, образуя выступы, а у котлов с дымогарными трубами со стороны входа горячих газов выступающие концы труб из решётки после развальцовки подвергаются разбортовке и расчеканке, делая буртики.

При развальцовке соблюдаются следующие требования:

1) для лучшего соприкосновения поверхности дыра решётки и концы труб должны быть круглые, не иметь продольных бороздок и очищены до металла, а концы труб кроме того хорошо отожжены;

2) материалы труб и решётки по своим качествам должны соответствовать друг другу; нельзя ввальцовывать трубу из твёрдого металла в очень мягкое гнездо решётки;

3) зазоры между ввальцовываемой трубой и отверстием решётки должны быть достаточными для получения плотности и отпружинивания отверстия решётки и тем меньше, чем мягче металлы решётки и чем толще стенки трубы.

При ручной развальцовке излишним усилием можно сильно сжать металл трубы и раздать отверстия решётки, последствием чего могут быть трещины между отверстиями решётки. Частая вальцовка вследствие расстройств соединений иечи труб также приводит к перенапряжению и образованию трещин. Во многом качество развальцовки зависит от опытности и тщательности работы котельщика.

Для кипяtilьных труб необходимо требование отсутствия овальности, потому что при некруглых сечениях труб труднее удаётся удаление накипи из более удалённых мест от центра, где накипь может оставаться. Кроме того, при сжигании несортированных углей рекомендуется увеличивать толщину стенок кипяtilьных труб первых нижних рядов, так как они более страдают от грызущего действия летящих твёрдых частиц дымовых газов и от процесса их догорания.

Заклёпочные швы вследствие возможности деформирования и наклёпа при клёпке и чеканке, а также ввиду многодельности, удорожающей работу и требующей дорогого оборудования, вытесняются более дешёвыми сварными швами, которые в свою очередь имеют свои недостатки. Доброкачество и надёжность сварки остаётся скрытой и зависит от индивидуальных качеств сварщика, а потому она требует надёжного контроля. Нужно также иметь в виду, что проводимая одновременно со сваркой проковка для уплотнения наплавного металла шва полезна лишь при надлежащем нагреве с последующим отжигом; в противном случае, как всякий местный нагрев и деформирование, она вызывает сомнение и может не улучшить, а ухудшить свойства металла.

Также отрицательное влияние на прочность оказывает утолщение шва. Исследования показывают, что излом образцов при переменном изгибе происходит по месту перехода в утолщение.

Из приведённого перечня недостатков видно, что в заклёпочных швах могут возникать такие напряжения, которые не поддаются

ся расчётам и не могут быть учтены применением различных значений коэффициентов степеней надёжности материала и прочности шва за счёт утолщения стенок.

Также не гарантируется, что напряжения могут оставаться в пределах, допускаемых расчётами на загибах и отбортовках днищ, разных отворотов и отфланцовок соединений с малыми радиусами закруглений и крутых оттибов, в результате чего получаются надрывы из-за недостаточной эластичности.

Такие надрывы и трещины часто встречаются на загибах отбортовок с малым радиусом закруглений, особенно у днищ котлов старых конструкций, так называемых сводчатых, от повторных напряжений, тепловых деформаций и жесткости конструкций, чему особенно благоприятствуют складки и морщины, полученные при штамповке.

В отверстиях заклёпок, труб, вырезов, дазов, лючков и т. п., кроме растягивающих и изгибающих напряжений, а также полученных при чеканке и развальцовке, возникают напряжения на кромках, так называемые Rundspannungen, от нарушения равномерности распределения напряжений. Происходит это потому, что линии сил, которые должны были идти по месту отверстий, сгущаются у его краёв, вследствие чего, получаются надрывы по краям.

При неправильной обработке и при нагревах частей во время сборки и ремонта котла лучший испытанный материал может быть испорчен путем насильственного загибания ударами, пригонки друг к другу неправильной формы поверхностей и растягивания металла, а также из-за частичных подогревов, пробивки дыр, наведения несовпадающих дыр оправкой и обрезки кромок ножницами, словом, всякой наклёпки, причём всё это оказывает громадное влияние на прочность. Приведённое выше указывает на необходимость надзора за качеством работы при сборке котла и за применением испытанных материалов, что может быть осуществлено на хорошо оборудованных заводах. По этой причине котлы кустарного изготовления не внушают особого доверия.

Из множества примеров недоброкачественного изготовления и сборки котлов можно привести наиболее яркие, имевшие место за последнее время.

У нескольких пролётных котлов типа судовых после 8—16 месяцев работы обнаружено массовое образование надрывов со стороны огня по кромкам швов соединений топки с огневой камерой, а также шинельного листа с решёткой и донышком огневой коробки. Оказалось, что у повреждённых швов вследствие неудовлетворительной приладки склепываемых частей имелись зазоры до 1,5 мм, плотность же швов достигалась чеканкой. Получившаяся прослойка воздуха вызвала резкую разницу температур и перегрев металла с образованием надрывов, чему способствовали перенапряжения от клёпки и чеканки и деформации от перемены температур при вводе холодного воздуха во время шуровок и чисток котла.

с о
пос
с н
бор
ник
клё
укр
ким
гот
га.
удо
оч
рабо
по
отва
над
ческ
спус
каза
сокс
Е
леза
стру
2) м
силы
ной
возм
собл

П
факт
осно
лях
преж
С
1) ка
сбрас
готов
в кот
правн
работ
П
нем
Как д
ных

У шести небольших оборотных котлов, у которых поставлены с одной стороны жаровая труба, а с другой — дымогарные трубки, после непродолжительной работы появились радиальные надрывы с наружной стороны, сверху плоских задних днищ по загибу отбортовок горловин жаровой трубы. В трёх случаях при ударе ручником в области надрывов образовались сквозные трещины от заклёпки шва соединения днища с жаровой трубой до заклёпки шва укрепляющих косынок. Образование трещин сопровождалось резким звуком и расхождением их краёв. Выяснилось, что днища изготовлялись вручную с 12—15 нагревами без последующего отжига. В обоих случаях испытания и исследования материала дали удовлетворительные результаты и здоровую структуру.

У вертикально-водотрубного котла после трёх лет работы при очередном осмотре и чистке было обнаружено, что в нижнем барабане в продольном шве с двумя накладками от удара молотком по заклёпке отскочила головка, а при дальнейшем обстучивании отвалилось еще 12 головок со стороны огня при наличии старых надрывов на большой площади стержня. Предполагались каустическая хрупкость и сокращение заклёпок от охлаждения водой спускных трубок. В результате исследования металла заклёпок показало большое содержание серы и закалённость металла от высокого нагрева и быстрого охлаждения.

В других случаях привлекли внимание дефекты структуры железа заклёпок. По микроснимкам наблюдались: 1) видманштеттова структура, указывающая на перегрев заклёпок перед клёпкой, 2) мартенситовая структура (феррит + мартенсит), показывающая сильный закал, когда перлитовые участки α -железа доэвтектоидной стали перешли в мартенсит (γ -железа); такая закалка заклёпок возможна при неправильной организации и неисправности приспособлений машинной клёпки, особенно гидравлической.

ПОРОКИ И ДЕФЕКТЫ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА

Правильное освещение вопросов происхождения и влияния дефектов структуры на прочность котельных материалов является основанием для определения как состояния паровых котлов, в целях возможно максимального использования и ограничения случаев преждевременной браковки их, так и изъятия котлов из действия.

Состояние и прочность котлов зависят от следующих факторов: 1) качества материала; 2) способов механической и термической обработки металла как при самом производстве его, так и при изготовлении котлов; 3) конструкции и системы котлов; 4) наличия в котлах повреждений и дефектов, происшедших вследствие неправильного ухода за ними при эксплуатации; 5) напряжённости работы; 6) рабочего давления и температуры.

Поэтому возраст котлов не может служить исходным критерием для суждения о пригодности их к дальнейшей работе, так как долговечность котлов является производной многих разнородных независимых факторов при их изготовлении и эксплуатации.

Главным фактором для определения возможности дальнейшей работы котлов, особенно старых и дефектных, являются механические свойства и состояние структуры материала котла.

Вопросы испытания и оценки материалов старых действующих котлов требуют вдумчивого подхода.

Особенно неблагоприятно обстоит дело с оценкой качеств и свойств материала старых котлов, так как отсутствие определённых критериев для допустимой степени развития дефектов и неправильное представление об условиях их возникновения часто приводят к неправильным толкованиям результатов испытания.

Исходя из положения, что структура металла определяет его свойства, можно было бы полагать, что микроскопическое исследование, как более тонкий метод анализа, даёт более точные результаты для определения качеств котельного материала у котлов, взятых под сомнение, нежели грубое, хотя и более наглядное механическое испытание, нарушающее целостность котла вследствие необходимости делать большие вырезки.

Однако практика обследования старых котлов и постановка дела по испытанию и оценке качества металла выявили, что микроскопическое исследование, преследующее сохранение котла, вместо ограничения величины вырезок приводило к многочисленным вырезкам больших образцов для механических испытаний и даже к усиленной браковке котлов вследствие неправильного толкования значения обнаруженных дефектов структуры.

Часто встречалось, что обнаружение какого-либо структурного дефекта при металлографическом исследовании влекло за собой проверочное механическое испытание, которое обычно давало удовлетворительные результаты на разрыв, загиб и удар. Однако вырезка больших образцов для испытания иногда непоправимо нарушала целостность котла или котёл просто браковался из-за наличия природных дефектов структуры, получившихся во время производства металла и изготовления котла, с которыми котёл работал много лет со времени установки и, очевидно, мог бы работать и далее.

Такое положение, влекущее за собой порчу котлов вырезками и браковку их, происходит вследствие нескольких неясных установок: 1) до изготовления котла не производится исследования дефектов структуры котельного материала, по которым бракуются работающие много лет котлы; 2) исследовательские лаборатории и инспекция котлонадзора мало знакомы с условиями образования различных дефектов структуры и не представляли себе ясно причин их возникновения, почему и относят образование дефектов, получившихся при производстве материала и изготовлении котла, ко времени его эксплуатации; 3) каждый дефект структуры в котельном материале может находиться в различных стадиях своего образования, а понижение прочности материала может наступать лишь при наличии дефекта в определенных степенях его

развития, причём эта степень развития дефекта, при которой его присутствие не отражается на прочности, неизвестна.

Строение и свойства металлов во многом зависят от способов производства и последующей обработки.

Сплавы при одном и том же химическом составе могут иметь различные механические качества и характеристики и по своему строению и свойствам не являться однородными во всех своих точках.

Все свойства сплавов порождаются совокупностью составляющих их структуру микроскопических частиц и состоянием атомно-кристаллических решёток. В твёрдых растворах атомы одного элемента располагаются внутри атомно-кристаллических решёток другого. Между атомами существуют силы взаимодействия, разные по величине и направлению для разных атомов. Силы взаимодействия между атомами не остаются постоянными, а меняются вследствие явлений диффузии, и решётки могут претерпевать изменения в зависимости от внешних и внутренних условий — температуры, давления и концентрации.

При той или иной термической и механической обработке из одного и того же по химическому составу сплава железа с углеродом можно получить различную структуру — целую серию дисперсоидов разной степени дисперсности. При нагреве и охлаждении системы степень дисперсности уменьшается или увеличивается. В смысле прочности применяются лишь определенные степени дисперсности. Крайние степени — твёрдые растворы и грубые дисперсии — менее надёжны, чем промежуточные стадии.

Железо-углеродистые сплавы рассматриваются как системы из нескольких компонентов, которые могут претерпевать превращения при изменении теплового состояния. При температурах критических точек железо с углеродом и другими элементами даёт однородные твёрдые растворы, которые с понижением температуры распадаются, причём выкристаллизовываются вещества, растворённые в твёрдом растворе.

Если при понижении температуры ниже критической точки A_3 распаду твёрдого раствора ничего не мешает, то компоненты выделяются в виде кристаллитов. В противном же случае кристаллизация будет остановлена, и нераспавшийся твердый раствор будет зафиксирован при обыкновенной температуре в том состоянии, в каком он находился при высокой температуре (в неустойчивом равновесии), причём он будет стремиться перейти в более стабильную форму, соответствующую температуре, давлению и концентрации.

Состояние системы в зависимости от различных внешних и внутренних факторов может находиться в устойчивом и неустойчивом равновесии. Чем устойчивее система, тем меньше дисперсность составляющих её фаз и тем меньшим запасом энергии она обладает. Поэтому чем крупнее структурные выделения и чем более

они обособлены, тем система более устойчива, но тем меньше она надёжна в смысле сопротивляемости внешним усилиям.

При одном и том же содержании углерода и при одной и той же массе феррита отдельные выделения его могут быть большей или меньшей величины. Причина различной величины зёрен кроется в различных соотношениях кристаллических сил при кристаллизации из различных центров.

Рост зерна при нагреве обуславливается температурой, при которой прочность границ зёрен становится меньше прочности самого зерна. Прочность последнего, в свою очередь, зависит от присутствия других элементов, плохо растворяющихся в γ -железе. Элементами, укрепляющими границы зерна, являются алюминий, ниобий, ванадий, титан и др. Марганец, кремний, бериллий и др., наоборот, способствуют росту зерна, так как они образуют твёрдые растворы с железом.

Величина зерна есть функция состава, температуры, продолжительности нагрева и скорости охлаждения. Мелкозернистая структура, как обладающая большей поверхностью энергией, более надёжна в смысле сопротивляемости во время службы.

Всякая термическая и механическая операция сопровождается изменениями свойств и структуры металла, соответствующими температуре и давлению. При несоответствии температуры и давления получаются остаточные изменения, что обуславливает возможность эволюционных превращений.

Поэтому отдельные части и элементы котла после нагревов и обработки его при сборке должны подвергаться отжигу, гарантирующему устойчивость структуры. Быстрое охлаждение и холодное деформирование или наклёп при эксплуатации недопустимы.

К основным порокам строения металла, получающимся при разливе и затвердевании в процессе отливки слитка, относятся ликвация, или сегрегация, усадочная раковина и рыхлость, газовые пузыри и посторонние включения.

Ликвация даёт химическую неоднородность, порождаемую избирательным процессом затвердевания сплавов. Она обогащает слиток углеродом и особенно вредными примесями серы и фосфора в местах, затвердевающих последними. Ликвация сильнее проявляется во внутренних зонах слитка, чем во внешних, причем такая неоднородность не уничтожается ни прокаткой, ни ковкой.

Различают ликвацию дендритную, проявляющуюся в пределах одного кристаллита, и зональную — по зонам снаружи во внутрь слитка. Дендритная ликвация выражается в большей степени, чем зональная. При последней ликвируют преимущественно С, Р и S, при дендритной же более значительно сегрегируют специальные примеси: Mn, Ni, Cr, Mo и W, а потому их присутствие выявляет дендритную ликвацию более резкой.

При ослаблении зональной ликвации увеличивается дендритная, и наоборот. Для углеродистой стали большим злом является зональная ликвация.

Усадка металла при затвердевании и остывании может обусловить появление трещин вследствие напряжений от неравномерного изменения объема слитка. Кроме того могут наблюдаться расслоения, происходящие при раскатке не удаленной усадочной раковины.

Пока сплав жидкий, выделяющиеся газы всплывают и удаляются. По мере же кристаллизации и загустевания стали газы застревают в массе и образуют газовые пузыри, концентрирующиеся там же, где и примеси. В кипящей стали газовые пузыри происходят вследствие реакции между закисью железа и углеродом с выделением окиси последнего.

Газовые пузыри, не заварившиеся во время прокатки, дают расслоения, надрывы, трещины. Особенно опасны пузыри наружные, расположенные вблизи внешней корки, так как окисленная поверхность их стенок не сваривается.

Для борьбы с пузырчатостью путём раскисления закиси железа присаживаются успокоители или раскислители Mn, Si, Al, Ti. В зависимости от этого получаются стали кипящие, застывающие с кипением без присадки успокоителей, и спокойные, застывающие с добавкой присадок без кипения. Кипящие стали менее однородны и более подвержены разъеданию, а также рекристаллизации, спокойные же содержат больше посторонних включений от присадок успокоителей, но стареют слабее и более устойчивы к крипу при высоких температурах.

Стали спокойные обладают большой химической однородностью, в них сепрегаты распределены более равномерно, тогда как слитки кипящей стали имеют трёхслойную структуру с сильно выраженной сепрегацией внутренней средней зоны.

В спокойной стали меньше, нежели в кипящей, газовых пузырей, несваривающихся при прокатке от загрязнения окислами и сульфитами, но слитки спокойной стали имеют более глубоко расположенную усадочную раковину, что увеличивает отбросы. Спокойная сталь более загрязнена шлаковыми включениями, чем кипящая, так как шлаки при процессе кипения всплывают наверх слитка.

У кипящих сталей по сравнению со спокойными наблюдается большая склонность к старению и меньшая коррозионная устойчивость.

Стали раскисленные и успокоенные Si и Al (особенно последним) показывают меньшее падение ударной вязкости, нежели кипящие. Старение зависит и от содержания углерода: чем меньше углерода, тем большая наблюдается склонность к старению.

Сказанные достоинства и недостатки говорят о преимуществе применения спокойных сталей перед кипящими для изготовления котлов, особенно повышенного давления.

Посторонние включения различны. Шлаковые включения в литой стали получаются от реакции закиси железа с раскислителями, а также между различными элементами самих присадок, от износа огнеупоров набойки печи и от разливочного припаса. В сварочном

железе наблюдаются включения сварочного шлака, обычно вытянутые вдоль прокатки между зёрнами феррита.

Сульфиды присутствуют в виде редко встречающегося в котельной стали сернистого железа или его эвтектики, обуславливающих краснотом. Главным же образом сульфиды наблюдаются в виде зерен или вытянутых по направлению прокатки эллипсоидов сернистого марганца, не дающего твердого раствора с железом. Это вещество тугоплавкое, выпадающее в осадок до затвердевания сплава и служащее центрами кристаллизации, преимущественно вторичной.

Присутствие фосфидов наблюдается лишь при больших содержаниях фосфора, который при обычных предельных количествах до 0,05% находится в твердом растворе с железом, а потому влияние его тем вреднее, чем больше в стали содержится углерода. Фосфор способствует росту зерна и неравномерному распределению перлита, вызывает хрупкость на удар и придаёт хладноломкость. Вред серы более разносторонен: способствует старению, образованию трещин от усталости, ржавлению и истиранию. Предельное содержание серы для котельной углеродистой стали нормируется не свыше 0,04%, т. е. на 0,01% меньше фосфора.

Кислородные включения либо в форме закиси железа, либо получающиеся от раскислителей, выпадают в осадок и рассеиваются в виде твердых включений, загрязняя металл. Некоторые из них служат центрами кристаллизации. В нормально раскисленной стали содержание собственно кислорода незначительно. Действие растворенного кислорода и кислорода в виде закиси железа вызывает как краснотомость, так и хладноломкость. Нужно различать кислородные включения и нитриды, полученные вследствие диффузии воздуха при перегреве металла и при сварке, которые увеличивают твердость, пористость и снижают относительное удлинение.

Кроме перечисленных пороков структуры, обуславливаемых разливом жидкого металла и затвердеванием при процессе отливки слитка, металлографические исследования обнаруживают дефекты и ненормальности, получаемые от неправильной термической и механической обработки.

К таким дефектам структуры относятся следующие.

1. Видманштетова структура (крупнозернистая с клетчатым расположением выделений феррита в виде правильных геометрических фигур и с ослабленной связью между зёрнами) получается при сильном длительном перегреве и очень высокой температуре, близкой к температуре плавления. Видманштетова структура понижает механические свойства металла.

От структуры перегретого металла, которую можно исправить отжигом с выдержкой выше точки A_3 , нужно отличать структуру пережжённого металла, характеризующую, кроме крупнозернистости, химическими изменениями состава границ между зёрнами, с окислением их поверхностей от проникновения кислорода воздуха.

Пережжённый металл имеет чрезвычайно низкие механические свойства, так как связь между зёрнами крайне слаба.

2. Выделения структурно свободного цементита в малоуглеродистой стали с малым содержанием марганца, происходящее при медленном охлаждении в интервале критических температур $A_3 - A_1$ и особенно при медленном переходе через точку A_1 . Эта структурная составляющая при больших выделениях обособляет зёрна феррита и ухудшает механические качества металла, в особенности ударную вязкость.

Структурно свободный цементит образуется потому, что границы зёрен имеют искажённую атомно-кристаллическую решётку, вследствие чего силы сцепления между атомами α -железа в ней становятся большими, чем между атомами α -железа в неискажённой решётке зерна, и приближаются по своей величине к силам сцепления в решётке γ -железа. Вследствие этого по границам зёрен становится возможным в α -железе удержание углерода в твёрдом растворе.

При отжиге зерно растёт, искажённые границы зёрен исчезают, а следовательно, пропадает и возможность растворения в них углерода. Поэтому при отжиге котельной стали с малым содержанием углерода на границах зёрен выпадает структурно свободный цементит, для уничтожения которого железо следует подвергнуть комбинированной обработке: отжига и нормализации, т. е. нагреть металл до температуры отжига, дать выдержку для растворения и равномерного распределения углерода и затем быстро охладить, как при нормализации. Медленное охлаждение между критическими точками приводит к своеобразной структуре размытого феррита с не резко очерченными границами между ферритом и перлитом. При неполном отжиге с нагревом в области температур $Ac_1 - Ac_3$ перлит начнет переходить в γ -железо и вызовет растворение феррита, размывая ферритовые зерна в виде прожилок, которые при охлаждении заполняются перлитом. Эти пронизывающие зерна полоски мешают деформации и понижают механические свойства, особенно относительное удлинение и поперечное сжатие.

Ко всему сказанному нужно добавить, что выпадающий мелкодисперсный цементит, обуславливающий явление старения (карбиды), нельзя смешивать и обобщать с более крупными выделениями структурно свободного цементита, наблюдаемыми в микроскоп.

Образование структурно свободного цементита свойственно лишь мягкой малоуглеродистой стали, особенно с низким содержанием углерода (менее 0,12) и малым содержанием марганца, при неправильном, медленном охлаждении в интервале температур критических точек $A_3 - A_1$. Старение может протекать в пределах даже при обычной температуре 20° и независимо от содержания углерода.

Температурная разница протекания этих процессов резко разделяет оба явления. Старение возможно во время работы котлов, особенно в частях, подвергавшихся деформированию. Образование

выделений структурно свободного цементита невозможно из-за отсутствия температуры порядка критической точки A_1 в стенке котлов. Такое выделение происходит во время производства стали или сборки котлов при медленном охлаждении в интервале критических температур $A_3 - A_1$ и особенно при медленном переходе через точку A_1 , как можно полагать, вследствие увеличения растворимости углерода в искаженных атомно-кристаллических решетках твердого раствора γ -железа.

3. Строчечная структура, имеющая вид книжных строчек, в которой более темный перлит, чередуясь со светлым ферритом, располагается на общем фоне светлого феррита.

Образование такой полосчатости, вытянутой вдоль прокатки, объясняется низкой температурой окончания прокатки и ликвацией серы в виде включений сернистого марганца и фосфора, чему способствует также скопление феррита в более крупные сгустки (медленное охлаждение в интервале критических температур). Сернистый марганец и другие неметаллические включения служат центрами вторичной кристаллизации. Строчечная структура понижает механические свойства металла в поперечном направлении.

4. Зернистый перлит, или сфероидизация перлита происходит вследствие перехода пластинчатого перлита в другую, более стабильную форму глобулярного перлита, обладающую меньшим запасом поверхностной энергии. Такой переход одной разновидности перлита в другую вследствие коалесценции пластинок цементита в перлите в шаровидные скопления возможен при длительном нагревании или медленном охлаждении при температуре немного ниже точки A_1 . В твердом растворе вследствие разной величины частиц цементита происходит перфузия в направлении от меньшей частицы к большей. Скорость перфузии, а следовательно, и рост большей частицы за счёт меньшей увеличивается с повышением температуры и уменьшением радиуса кривизны частиц цементита. Растущие частицы стремятся приобрести шаровидную форму, как более благоприятную по распределению действующих сил. Поэтому зернистый перлит не является первоначальной стадией образования структурно свободного цементита, и образование его возможно по всей массе стали и независимо от содержания углерода, тогда как развитие структурно свободного цементита может получаться лишь при малых содержаниях углерода и марганца и на границах зёрен.

Большее содержание углерода, холодная обработка и наклёп облегчают сфероидизацию перлита.

Зернистый перлит, по сравнению с пластинчатым, не вызывает заметных изменений статических и динамических свойств мягкой стали. Он оказывает существенное влияние на ползучесть, которую нужно рассматривать как пластическую деформацию, протекающую в условиях длительного приложения нагрузки, причём повторные нагревы ускоряют это влияние. Пластины цементита, пока в них не возникли трещины, искривляясь, препятствуют деформированию

феррита, а при образовании разрыва пластинок обуславливается дальнейшее развитие трещин, что и является причиной повышения хрупкости и снижения предела ползучести. Тонкослойный пластинчатый перлит легче искривляется и тем самым облегчает деформирование.

Сфероидизация пластинчатого перлита и превращение его в зернистый способствуют ползучести, так как сопротивление ей со стороны зернистого перлита меньше, чем со стороны пластинчатого. Сталь с пластинчатым перлитом обладает более высокими пределами ползучести. Скорость протекания как сфероидизации, так и рекристаллизации сильно зависит от состояния и обработки материала. Холодный наклеп и деформирование ускоряют и облегчают их протекание.

5. Рекристаллизация, сопровождаемая укрупнением зерна и разупрочнением металла, происходит в предварительно упрочненном холодным деформированием металле при нагревании его до температуры приблизительно 500° для котельного железа, т. е. ниже критической температуры A_1 . Такой процесс стремится выправить искажение зерна, вызванное холодным наклепом, за предел текучести и влечет за собой очень сильный рост зерна, сопровождаемый большим падением удлинения поперечного сжатия и, в особенности, ударной вязкости. Наклеп и пластическая деформация упрочняют металл, а рекристаллизация разупрочняет его.

Исследованиями установлено, что склонность к рекристаллизации зависит от длительности и температуры нагрева, степени предварительной деформации, первоначальной величины зёрен, содержания в стали примесей (особенно углерода). Чем меньше углерода, тем наблюдается большая склонность к рекристаллизации.

Рекристаллизация возможна и в деталях частей котла, предварительно деформированных в холодном состоянии, а также обработанных при недостаточном или частичном местном нагреве, т. е. получивших наклеп и не подвергнутых затем отжигу для снятия наклепа или неправильно отоженных.

Температура рекристаллизации тем ниже, чем меньше были зёрна до холодной обработки, чем сильнее была деформация и чем ниже температура, при которой происходила деформация. При крупном зерне склонность к рекристаллизации больше и скорость протекания быстрее, чем при мелком.

Малоуглеродистая сталь более подвержена рекристаллизации, так как углерод вообще противодействует росту зерна. Поэтому твёрдые сорта с более высоким содержанием углерода менее чувствительны к рекристаллизации, к холодной деформации и к последующим нагревам до температуры работы котла. Чем мягче сталь и чем меньше в ней содержится углерода, тем она требует более осторожного обращения при сборке котла.

Наибольший рост зерна котельного железа получается при критической деформации, равной 10%, с последующим критическим рекристаллизующим отжигом при температуре $700-800^{\circ}$.

6. Холодная обработка металла, или наклёп, в зависимости от степени пластической деформации, даёт микроскопически типичные признаки деформации в виде линий скольжения, а на макрошлифах линии Людерса или Гартмана в виде полосок, расположенных в большинстве случаев под углом в 45° к действию усилия.

При этом нужно заметить, что между линиями скольжения и трещинами усталости, имеющими общий характер транскристалличности, отсутствуют связь и зависимость. Разрыв образцов вследствие усталости при знакопеременной нагрузке, когда повторное усилие меняет свою величину и направление, происходит ниже временного сопротивления и предела текучести. Линии скольжения получаются при нагрузках ниже предела усталости для всего материала, но при изломе от усталости эти линии образуются в местах слабости металла.

Исследования показали, что до появления трещин не происходит изменений механических статических свойств. Разрушение под действием знакопеременной изгибающей нагрузки, а также крутящей начинается с поверхностного слоя с появлением острой поверхностной трещины. Следовательно, состояние наружной поверхности имеет большое значение.

Большинство из перечисленных выше пороков, судя по температурам, соответствующим изменениям структуры при обычных нормальных условиях работы котла, произойти не может, а если бы такие температуры в стенке получились, то вызвали бы аварию и выход котла из строя.

В материале котла во время эксплуатации может иметь место только старение. Однако по изменению микроструктуры обнаружить наличие старения почти невозможно (правда, имеется способ протравки Фри), его можно выявить только испытанием на ударную вязкость. Таким образом, старение является не только наиболее серьёзным пороком, возникающим в металле во время работы котла, но и более трудно выявляемым.

Процессу старения, влекущему за собой изменение механических свойств (увеличение временного сопротивления, предела текучести и твёрдости и уменьшение пластичности и ударной вязкости), наиболее подвержены части котла, перетерпевшие деформирование, особенно в холодном состоянии.

Такие дефекты, как структурно свободный цементит, видманштеттова структура, рекристаллизация, сфероидизация, строчечная структура и т. п., обнаруженные в материале работающего котла, нужно считать природными пороками. Они могут получаться лишь при производстве котельного материала или при сборке котла, вследствие неправильной термической обработки, а не во время эксплуатации. С такими дефектами котлы работали с момента их изготовления. Это подтверждается тем, что микрошлифы образцов, взятых из одного и того же листа, но из разных мест котла, как подвергавшихся, так и не подвергавшихся действию огня, дают одинаковую структуру. При продолжительной службе котла

следует опасаться изменений механических свойств и главным образом снижения ударной вязкости в местах перенапряженных, подвергавшихся холодному наклепу, и неотожженных вследствие усталости, старения и, возможно, от протекания процесса дисперсионного твердения. Однако влияние этих процессов не может быть установлено ни механическими статическими испытаниями, ни металлографическими исследованиями. Взятие проб и вырезок из этих мест, подвергавшихся наибольшему деформированию — швов, загибов, отбортовок и пр., практически невозможно, а испытания проб из целого места листов, не подвергавшихся деформированию при изготовлении котла, не показательны.

Протекание процессов крипа, сфероидизации и рекристаллизации почти невозможно в условиях работы при обычных невысоких давлениях, для высоких же давлений и температур применяют особые крипоустойчивые стали. В большинстве случаев проводимые массовые проверочные статические испытания металла старых паровых котлов, сопряженные с вырезкой больших темплетов, что во многих случаях равносильно уничтожению самого котла, не улавливают природных дефектов структуры, открываемых под микроскопом и, как правило, дают положительные результаты, что указывает на их бесцельность. Поэтому при сомнениях в качестве материала целесообразнее, не нарушая целостности котла вырезками 400×400 мм, производить металлографические исследования, вырезая для этой цели без особой порчи котла пробку диаметром 12—20 мм из расчета возможности постановки заклёпки.

Такие исследования дают основания для суждения о качестве металла по его структуре и исключают необходимость подвергать большим вырезкам для механического испытания котлы со структурой здоровым материалом или с имеющимися природными дефектами, но проработавшие многие годы.

По последней инструкции Котлонадзора от 11 июня 1942 г., допускается замена плоских длинных образцов, требующих вырезки больших темплетов, кольцевыми образцами диаметром 36—38 мм. Такая замена едва ли упрощает дело, так как нарушение целостности котла и заделка отверстий как для кольцевых, так и для плоских образцов равноценна. Эта же инструкция хотя и предусматривает металлографическое исследование, но лишь как проверочное в случаях малоудовлетворительных и сомнительных по результатам механических испытаний.

Рациональнее микроисследования старых котлов производить не после, а до механического испытания. Тогда при определении здоровой структуры отпадает надобность в вырезке для механического испытания.

В случае сомнения относительно возможности старения стенки котла (не швов или отбортовок, откуда образцов взять нельзя) следует ограничиваться вырезкой образцов для ударных испытаний.

Обычно исследовательские лаборатории, не отдавая себе отчета в рабочей температуре стенки котла, относят всякий обнаружен-

ный дефект и изменения структуры к длительным нагревам во время продолжительной службы даже тогда, когда речь идет о совершенно необогреваемой части котла, и предлагают производить проверку качества механическими испытаниями. Наибольший процент испытаний падает на случаи обнаружения структурно свободного цементита.

Приходилось встречаться со следующими заключениями лабораторий: 1) «Должны предупредить, что в ланкаширских котлах наиболее ответственную работу несет жаровая труба. Она работает в обстановке нагрева 550—600°, наиболее благоприятствующей образованию структурно свободного цементита».

2) «Сталь под влиянием высоких температур при длительной работе котла получила обезуглероживание поверхности и видманштеттовое строение».

На самом деле температура нагрева стенок, омываемых водой при эксплуатации, не превышает 300°, так что говорить об образовании структурно свободного цементита, а тем более о видманштеттовой структуре совершенно не приходится.

Такие заключения даны, не сообразуясь с условиями работы котла и не разбираясь в природе возникновения структурного дефекта.

Кроме браковки и изъятия из работы здоровых котлов, встречалось несколько случаев, когда, в поисках структурно свободного цементита и видманштеттовой структуры, в каждом из котлов было сделано до 20—26 высверловок диаметром даже до 30—35 мм, кроме двух-четырех вырезов в 400×400 мм для механических испытаний. Число наблюдались повторные ежегодные микроисследования, повидимому, в предположении, что видманштеттова структура и цементит при эксплуатации котлов растут не по дням, а по часам и пр. Однако на вопросе, каким образом могли получиться эти изменения структуры при поверхностях, омываемых водой или при совершенно необогреваемых частях котла, повидимому, не останавливались.

Привести результаты многих интересных случаев испытаний металла котлов не представляется возможным, а потому здесь даются лишь некоторые характерные случаи, имевшие место за последнее время.

1. Испытание качества материала топочного огневого листа, получившего отдулину от перегрева стенки. Возраст, происхождение и материал батарейного котла неизвестны, но несомненно, что котел из сварочного железа. По данным лаборатории, металлографическое исследование показало: «Значительное количество шлаковых включений. Кристаллическая структура из чистых зерен феррита. Сильно дифференцированный перлит. Значительное количество структурно свободного цементита. Большое количество шлаковых включений и свободного цементита не даёт оснований считать материал удовлетворительным».

Испытания, проведенные в другой лаборатории, дали следующие результаты: «Просмотр шлифов подтверждает правильность микроанализа первой лаборатории».

Химический анализ: $C = 0,09$; $Mn = 0,45$; $Si = 0,01$; $S = 0,05$; $P = 0,025\%$.

Механическое испытание на разрыв: вдоль — временное сопротивление — 35,1 кг/мм², относительное удлинение — 20,2%; поперёк — временное сопротивление 33,8 кг/мм², относительное удлинение — 17,4%; загиб на 180° при d , равном нулю, выпуклую, образцы выдержали (d — диаметр оправки).

Ударная вязкость 8,08; 7,63; 7,22; 8,06 кДж/см².

На изломе образцов заметна слоистость, идущая по всей толщине металла.

Проба на загиб показала, что образец № 1 с насечённой поверхностью внутрь (от чистки котла острым инструментом) выдержал испытание до соприкосновения сторон, а образец № 2 с насечённой поверхностью наружу при 160° изгиба дал трещину, при соприкосновении же сторон выявилось сплошное по всей толщине расслоение.

По правилам установлены пределы для железа старых котлов для сварочного железа должны быть: временное сопротивление вдоль прокатки более 24 кг/мм² и поперёк более 22 кг/мм², относительное удлинение — вдоль и поперёк более 12%, а для литого и неизвестного происхождения железа должно быть временное сопротивление более 29 кг/мм² и относительное удлинение более 15%.

Таковы результаты испытаний получившего перегрев сварочного железа котла постройки не позднее 90-х годов.

2. Ланкаширский котёл постройки 1904 г. Металлографическое исследование железа жаровых труб: «Феррит 0,9 + перлит 0,1; большое количество структурно свободного цемента. Подвергнуть металл механическому испытанию».

Повторное исследование другой лаборатории. «Перлит местами дифференцирован и наличие структурно свободного цемента. Твёрдость по Бринеллю 101. Требуется проверка механических свойств».

Произведённое механическое испытание коротких образцов на прессе Гагарина дало:

Временное сопротивление (в кг/мм ²)	Относительное удлинение (в%)
= 33,2	= 32,2
" " = 32,7	" " = 31,4
" " = 32,8	" " = 30,7
" " = 32,2	" " = 27,0
" " = 32,7	" " = 28,1
" " = 32,9	" " = 26,4

Испытания на копре Шарпи дали следующие результаты (в кгм/см²):

12,2	11,8
12,1	12,2
12,1	12,2

Как видно, механические испытания показали высокие свойства как при разрыве, так и при ударном испытании.

3. Ланкаширский котёл, завод-изготовитель и год постройки неизвестны. Металлографическое исследование материала обеих жаровых труб показало: «Феррит 0,94 + перлит 0,05. Наличие структурно свободного цементита и явлений рекристаллизации. Неудовлетворительное качество железа».

Механическое испытание:

1) разрыв коротких образцов на прессе Гагарина:

по месту сварки

Временное сопротивление (в кг/мм ²)	Относительное удлинение (в %)
35,7	= 17,1
37,2	= 22,2
38,0	= 13,3

Ударная проба на копре Шарпи (в кгм/см²):

7,17	3,5
9,62	8,15
0,59	

2) разрыв коротких образцов на прессе Гагарина:

по месту сварки

Временное сопротивление (в кг/мм ²)	Относительное удлинение (в %)
= 32,0	= 13,0
= 34,5	= 12,4
= 37,2	= 14,7

по целому месту

= 34,7	= 28,9
= 34,9	= 28,2
= 34,9	= 28,7

Ударная проба на копре Шарпи (в кгм/см²):

по целому месту	по сварному шву
12,2	6,0
12,15	8,15
12,1	7,31
	0,99
	10,85

Причиной понижения показателей на удар и по относительному удлинению, конечно, является качество сварки обечаек жаровых труб.

4. Два ланкаширских котла поверхностью нагрева по 82 м² на рабочее давление 10 атм; постройки завода Фитцнер и Гампер 1907 г.

Исследование образцов железа дало: «Сталь феррито-перлитовая с неравномерным расположением перлита, на некоторых микрошлифах строчечная структура; наличие структурно свободного цементита, обезуглероженных зон и на одном снимке следы видманштетовой структуры». Образование дефектов лабораторией отнесено за счёт длительных нагревов во время продолжительной службы котлов.

Образцы, взятые из необогреваемых частей тех же листов, показали те же недостатки.

Механическое испытание:

Котел № 2

поперек прокатки

Временное
сопротивление (в кг/мм²) — 34,5
— 34,5

Относительное
удлинение (в %) — 25,5
— 27,2

вдоль прокатки

Временное
сопротивление (в кг/мм²) — 34,0
— 37,7

Относительное
удлинение (в %) — 26,7
— 25,0

Котел № 1

поперек прокатки

Временное
сопротивление (в кг/мм²) — 35,5
— 36,5

Относительное
удлинение (в %) — 24,3
— 25,0

вдоль прокатки

Временное
сопротивление (в кг/мм²) — 36,3
— 39,6

Относительное
удлинение (в %) — 18,2
— 19,8

Холодный загиб на 180° образцы выдержали.

Дефекты были в котельном материале и до постройки котла, причём они не отразились на результатах статическо-механического испытания. Ударных испытаний не было.

5. Два ланкаширских котла поверхностью нагрева по 104,75 м² на рабочее давление 10 атм; постройки завода Фитцнер и Гампер, 1897 г.

Металлографическое исследование: строчечная структура, сильно дифференцированный перлит; значительное количество структурно-свободного цементита.

Химический анализ (в %):

I. C = 0,05, Mn = 0,5, Si = 0,07, S = 0,033, P = 0,07.
II. C = 0,06, Mn = 0,46, Si = 0,08, S = 0,033, P = 0,07.

Механическое испытание:

Котел № 1

Временное
сопротивление (в кг/мм²) — 34,663
— 34,637
— 39,310
— 38,815

Относительное
удлинение (в %) — 27,4
— 22,6
— 20,75
— 19,50

Котел № 2

Временное сопротивление (в кг/мм²): 36,5

Относительное удлинение (в %)

— 27,7
— 25,8
— 22,4

Жаровые трубы

— 34,1
— 33,3
— 22,1
— 22,4

Отсюда видно, что наличие значительного количества свободного цементита не отразилось на показателях механического испытания.

6. Четыре паровых котла за № 1, 5, 8 и 9 по предпятию; постройки разных заводов.

Результаты металлографических исследований: сильно дифференцированный перлит; значительное количество структурно свободного цементита.

Механическое испытание:

котел № 1 — системы Штейнмюллера постройки завода Борман, Шведе и К^о, Варшава;

временное сопротивление 34,8 кг/мм²; относительное удлинение — 28,2%;

котел № 5 — двухбарабанный, системы Гарбе, постройки завода Брант, Фастов;

временное сопротивление — 33,8 кг/мм²; относительное удлинение = 20,7%;

котел № 8 — системы Штейнмюллер постройки Сумского завода; временное сопротивление — 35,9 кг/мм²; относительное удлинение = 22,9%;

котел № 9 — системы Штейнмюллер, постройки завода Борман, Шведе и К^о, Варшава;

временное сопротивление = 37,2 кг/мм²; относительное удлинение = 23,6%.

Таких результатов испытаний можно привести множество.

Котлы после заделки вырезов продолжают работать без помех.

Хрупкость, вызываемая структурно свободным цементитом, с повышением температуры, вследствие увеличения вязкости, скрадывается, что подтверждается произведённым грубым экспериментом.

Двум образцам, вырезанным из котла с присутствием в них структурно свободного цементита, были произведены испытания на загиб ударами молотка до соприкосновения сторон:

1) при обыкновенной температуре образец дал удовлетворительные результаты;

2) на морозе при охлаждении до — 35° С получились надрывы по месту загиба.

Этот же образец, но нагретый до температуры выше 100°, при загибе по другому соседнему сечению не дал надрывов.

Нужно отметить, что все выводы, сделанные относительно влияния структурно свободного цементита, имеют своим основанием исследования и наблюдения в отношении мягкой стали, работающей при низких температурах, как-то: рельсов, вагонных осей, бандажей и пр., причём эти наблюдения без соответствующих поправок переносятся на материалы котлов, работающих в иных температурных условиях и нагрузках.

Поверочные испытания при наличии структурно свободного цементита на разрыв, загиб и ударную вязкость без наличия других дефектов всегда давали удовлетворительные результаты. Зернистый перлит, точечный и строчечный цементит почти не снижают механических свойств. Замечается некоторое снижение временного сопротивления; повидимому, слияние цементита-перлита, концентрируя углерод, как бы обезуглероживает железо, но в то же время

не увеличивает относительного удлинения. Крупные скопления цементита в нити в виде сетки, обособляющей феррит по границам зёрен, более понижают механические свойства, но всё же это понижение не доходит до установленного предела для железа старых котлов. Такие выделения, окаймляющие зёрна феррита, должны вызывать падение ударной вязкости и повышать чувствительность к старению. Поэтому проба на ударную вязкость более характеризует влияние структурно свободного цементита, нежели статическое испытание и относительное удлинение; показатели последнего и ударной вязкости независимы друг от друга.

Зависимости между стадиями развития порока и механическими свойствами материала неизвестны, а следовательно неизвестна и степень допустимого порока.

На обращения в специальные котельные институты за разъяснениями о влиянии структурно свободного цементита были получены ответы, что один из этих институтов занимается вопросами топливосжигания, а другой — решением проблем материалов новых котлов высокого давления.

На запрос главной инспекции котлонадзора НКПС в Академию Наук в 1937 г. относительно необходимости механических испытаний при наличии структурно свободного цементита был получен следующий ответ: «Мнение о том, что появление структурно свободного цементита относится ко времени производства железа на заводе, а не ко времени эксплуатации котла, совершенно правильно, но при наличии структурно свободного цементита в материале старых котлов необходимо производить механические испытания».

Припоминаются и курьёзные случаи. На одном предприятии попросили осмотреть котёл, у которого происходило непонятное внутреннее разъедание, приписывавшееся влиянию структурно свободного цементита, определённого исследованием в железе котла.

Внутри котла на заднем днище по хорде и на смежном с ним звене корпуса на уровне воды оказались типичные разъедания от обогревания газами и колебания уровня вследствие завышения огневой линии обмуровки и неплотного прилегания к днищу перекрытия газохода.

На другом предприятии у котла, также вследствие наличия структурно свободного цементита, для проверки механических свойств догадались вырезать узкую часть днища между жаровыми трубами, но не подумали о заделке его. Такие случаи резки днищ не единичны, что почти равносильно уничтожению котлов, так как найти новые днища подходящего размера невозможно.

Из особо показательных случаев просятся быть отмеченными следующие. У шести ланкаширов существенным природным дефектом была неудовлетворительная сварка царг жаровых труб в виде следов расслоения, с течением времени рельефно размытых котловой водой. После повторных исследований в течение трёх лет железа корпуса и жаровых труб, показавших наличие свободного цементита, и после механических испытаний, давших положитель-

ные результаты, у пяти котлов было проведено генеральное испытание железа труб. Кроме металлографических исследований, в каждом из пяти исследуемых котлов было проделано по 12 механических испытаний коротких образцов и 12 испытаний на ударную вязкость, по шести образцов, взятых из целого места и по месту сварного шва жаровых труб. Результаты испытаний на разрыв, загиб и ударную вязкость у образцов из целого места получились хорошие, а по месту сварки имелись пониженные показатели по относительному удлинению и ударной вязкости, при удовлетворительном временном сопротивлении.

Причина такого понижения удлинения и ударной вязкости очевидна: она заключалась не в наличии цементита, а в качестве сварки. Эти пять котлов были забракованы, но вследствие отсутствия новых заменить их не могли. Пришлось заделывать их и заваривать вырезки для дальнейшей работы до демонтажа. Шестой котел, одинаковый с ними, изготовления того же завода и года постройки, имеющий те же недостатки и аналогичные условия работы, но не подвергавшийся испытанию, продолжал работать на первоначальном давлении. Результаты исследований и испытаний ввиду их обширности представить невозможно.

Два ланкаширских котла, работавшие на давление 5 атм вместо 7, после 30 лет работы были подвергнуты последовательно двум механическим испытаниям, которые дали хорошие результаты на разрыв, и испытанию на холодный загиб на 180° .

Первое механическое испытание.

Котел № 1

Вдоль прокатки. Временное сопротивление (в кг/мм ²)	— 32,9
Поперек прокатки	30,72
Относительное удлинение (в %)	— 24,16
"	— 20,92

Котел № 2

Вдоль прокатки. Временное сопротивление (в кг/мм ²)	36,34	Относительное удлинение (в %)	25,56
Поперек прокатки	35,18	"	26,48
Испытание на загиб в 180° образцы выдержали			

Второе механическое испытание.

Котел № 1

Временное сопротивление (в кг/мм ²)	34,7	Относительное удлинение (в %)	26
	35,5		24

Котел № 2

Временное сопротивление (в кг/мм ²)	37,3	Относительное удлинение (в %)	17,4
---	------	-------------------------------	------

(Образец взят по месту образования выпучины от выпуска воды в жаровой трубе).

Испытание на загиб в 180° образцы выдержали.

Химический анализ (в %):

Котел № 1

I. C = 0,172; Mn = 0,69; Si = 0,02; P = 0,05; S = 0,06
II. C = 0,17; Mn = 0,65; Si = 0,01; P = 0,05; S = 0,06

Котел № 2

I. C = 0,16; Mn = 0,48; Si = 0,03; P = 0,05; S = 0,06
II. C = 0,15; Mn = 0,45; Si = 0,02; P = 0,05; S = 0,06.

Металлографическое исследование показало «строгую» структуру и перлит, расположенный по границам зёрен с образованием структурно свободного цементита».

Котлы были изъяты. Для замены их был привезён с другого завода большой ланкашир более позднего выпуска, который в свою очередь был переброшен с ликвидированного предприятия. При обеих перевозках гужом у котла отклёпывались днища, и корпус расклёпывался на три части, а затем на месте склёпывался. После такой трёхкратной переклёпки, кроме заварки многих образовавшихся трещин от кромки до заклёпки, пришлось поставить шесть заплат по поперечным швам, по соединениям царг жаровых труб и по соединению с задним днищем; в результате была обнаружена течь по швам при гидравлическом испытании.

Проделанные испытания железа до и после переклёпки из целых мест дали вполне удовлетворительные результаты, причём структурно свободный цементит отсутствовал. Испытание коротких образцов из кусков поперечных швов, вырезанных для заплат, дали отрицательные результаты, а микроснимки показали значительные сдвиги от пластической деформации за предел текучести.

Переклёпки и связанные с ними деформирования и наклёв привели к сильному ухудшению качества материала. Свободный цементит внушал опасения, а кустарная расклёпка и переклёпка местными силами, — повидимому, большое доверие. За недостатком места могу привести лишь один случай переклёпки.

Особое внимание обратили на себя имевшие место за последний год предписания о производстве механических испытаний материалов.

1. У 14 котлов Ферберна постройки 1905—1906 гг., работавших на 8 ати, произведённый в двух лабораториях микроанализ 54 образцов из разных мест котлов выявил образование зернистого перлита и структурно свободного цементита в результате, якобы, «длительной работы».

Из создавшегося положения вышли компромиссным, хотя и не вполне логичным, путём. Поверхность нагрева семи котлов заменили новой, другие же семь котлов продолжали работать.

2. У шести котлов Менье вследствие наличия структурно свободного цементита, по заключению лаборатории, «в процессе работы структура изменилась в сторону ухудшения, материал признан неудовлетворительным».

Вопрос о последних котлах, согласно записям в котельных книгах, инспекция оставила «временно открытым», но снизила рабочее давление у одних котлов до 6,1, а у других до 4,5 ати.

Нельзя отрицать, что при структурно свободном цементите, обуславливающим хрупкость, могут образоваться трещины: но если котлы работали свыше 30 лет и никаких опасных симптомов не наблюдалось и не наблюдается, то нет оснований резать котлы, которые согласно многим аналогичным испытаниям а priori дадут положительные результаты.

Производимые статические и динамические испытания не улавливают влияния свободного цементита в той степени формирования, в какой он обычно обнаруживается в котельном железе. В этом вопросе — вопросе об испытаниях качества металла котлов — отсутствуют логика и чувство меры. Если наличие этого дефекта опасно для службы котлов, то, казалось бы, логичнее не допускать такие котлы к работе и предписывать производить проверочные испытания перед установкой котла, а не спустя 25—30 лет его работы.

Очевидность бесцельной резки и испытания материала при наличии структурно свободного цементита подтверждается ещё тем, что котлы после заделки вырезов продолжают работать, и этот дефект не проявляет себя ничем, как и до испытания.

Особенно интересны два случая, побудившие выступить с настоящей работой.

1. У приобретенного совершенно нового двухбарабанного горизонтально-водотрубного котла, как неостребованного груза, не оказалось данных о качестве и происхождении материала. После устаковки котла, чтобы не портить его вырезками для механических испытаний, было проведено металлографическое исследование железа барабанов, обнаружившее структурно свободный цементит. По выбитым номерам и знакам на барабанах и листах железа установили завод-изготовитель и происхождение материала и восстановили данные о материале. При этом оказалось, что один барабан принадлежит одному, а другой другому горизонтально-водотрубному котлу. Такой факт обнаружения структурно свободного цементита в новых котлах также подтверждает, что этот порок природный, получающийся до пуска котлов в эксплуатацию.

2. Ланкаширский котел после 29 лет работы был подвергнут металлографическому исследованию материала корпуса и жаровых труб в одной из лабораторий, которая дала следующее заключение.

«Микроструктура трех образцов перлит-ферритовая со значительным обособлением по границам феррита эвтектоидного цементита. Имеются признаки явления крипа (ползучести), что не гарантирует механической прочности металла в условиях его работы, тем более, что в плоскостях сдвига имеется обособившийся из перлита цементит.

Твердость образцов по Бринеллю: первого — 107, второго — 111 и третьего — 97,3.

Наличие на феррите фигур травления при нормальном микро-травлении характеризует напряженность металла.

По данным микроанализа образцов, количество углерода в них колеблется в пределах 0,15—0,20 %.

Что касается временного сопротивления и относительного удлинения исследованной стали, то определять это в зависимости от твердости, с использованием известных эмпирических формул нельзя, так как эти формулы имеют в виду сталь с нормальной, а не с дефектной микроструктурой, что имеется в данном случае. Поэтому для определения временного сопротивления и относительного удлинения необходимо произвести специальные испытания в механической лаборатории. Увеличение на микроскопе в 215 раз.

На основании такого вывода лаборатории было проведено на прессе Гагарина механическое испытание 17 вырезов на разрыв коротких образцов, взятых из разных мест котла, вдоль и поперек прокатки. Испытание это дало следующие результаты:

временное сопротивление в пределах 43,7—36,0 кг/мм²,

относительное удлинение — 22,0—28,2 %,

предел текучести — 24,7—27,6 кг/мм²,

относительное сужение — 63,4—67,0 %.

Полученные характеристики качества материала вполне удовлетворительны, но недостаточны для суждения о крипе.

Вызывает сомнение правильность вывода лаборатории в определении крипа при температуре стенок работы котла на давление 12 атм. Не является ли этот случай предвестником новой эпидемии резки котлов для искания крипа, подобной описанной выше в отношении исследований на структурно свободный цемент?

Правильное использование котлов имеет большое экономическое значение. Поэтому для решения вопросов, связанных с испытанием и исследованием материала, котлонадзору необходимо иметь специальную лабораторию, накапливающую опыт, без которого исследования получают разрозненными. Такая лаборатория должна пересмотреть методы испытания, нарушающие целостность котлов, и установить стандарт для микрорисследований.

От бесцельной резки пострадали уже сотни котлов, а по всем наркоматам — даже тысячи.

Следует провести серьезные экспериментальные исследования для установления зависимости прочности котельных материалов от степени развития дефектов структуры каждого испытания в отдельности и в совокупности с другими.

Котельные материалы необходимо при приёмке исследовать в лаборатории на структурные дефекты.

НЕЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ, НАРУШЕНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ И НЕПРАВИЛЬНОСТЬ УСТАНОВКИ КОТЛОВ

Приспособленность системы котла к условиям работы и режиму эксплуатации играет большую роль. Конструкция котла должна быть нежёсткой, эластичной и допускать свободное расширение и беспрепятственное удлинение, особенно при высоких температурах

и давлении, так как большие тепловые напряжения соответственно вызывают повышение тепловых деформаций. Поэтому у частей котла, получающих наибольшее количество тепла и подверженных действию лучеиспускания и прямой отдачи топки, должна быть предусмотрена возможность расширения каждого элемента.

Поскольку тепловые деформации от неравномерного нагрева стенок, происходящего вследствие отнятия тепла поверхностью от топочных газов и прогрева воды по причине плохой теплопроводности, являются неустраняемыми, должно быть обеспечено свободное обращение воды в котле. Последнее должно находиться в соответствии с испарительностью и сопротивлением движению воды, т. е. в соответствии с надёжностью циркуляции, являющейся главным фактором безопасности работы. Задача циркуляции заключается не столько в увеличении теплопередачи, сколько в перемешивании воды для выравнивания температуры и в отводе тепла для охлаждения нагреваемых стенок котла.

Против тепловых деформаций от неравномерного нагрева стенок и прогрева воды, а также разъедающего действия питательной воды борются подогревом воды до ввода в котел и усилением циркуляции, сообщая воде наибольшую скорость и постоянное направление движения.

Выгоды от подогрева питательной воды, утилизируя для этой цели тепло, теряемое с отходящими газами, заключаются не только в экономии расхода топлива, вследствие уменьшения неизбежной потери тепла через трубу, но и в большей сохранности котла.

При питании подогретой водой место ввода в котел испытывает меньшие внутренние напряжения от разности температур, стенки котла менее ржавеют и меньше отлагается накипи, так как часть растворенных в воде солей при подогреве выпадает в осадок.

Быстрый и правильный отвод тепла от поверхности нагрева стремится выравнять температуру во всех частях котла. Циркуляция является главным фактором безопасной работы котла.

Большая скорость движения воды препятствует как оседанию и отложению накипи, увлекая частицы накипеобразователей, так и прилипанию пузырей образовавшегося пара и выделяющегося из питательной воды воздуха и газов, смывая их со стенок.

При плохой циркуляции и слабом движении воды выделяющиеся пузыри пара, образуя изолирующий слой с плохой теплопроводностью, способствуют местным скоплениям и образованию мешков пара в местах, где стеснен его выход, и вызывают застой тепла и перегрев стенки. Всё это ведёт к образованию отдулин и выпучин, особенно у котлов с кипятильниками при несоответствующем их уклоне. От изменения направления циркуляции и уменьшения скорости движения воды возможен перегот кипятильных труб водотрубных котлов с вынужденной и организованной циркуляцией.

Скорость и постоянство направления циркуляционного потока по замкнутому контуру основаны на различных напорах столбов эмульсии и воды разного удельного веса в подъёмных и спускных

трубах благодаря различному обогреванию пучков. Поэтому при форсировках с уменьшением разности в интенсивности нагрева пучков возможно возникновение парообразования в спускном пучке. Последнее может вызвать торможение и создать большое сопротивление потоку и даже обратную циркуляцию.

Основным условием надежности циркуляции является значительное расхождение величин относительной скорости движения пара со скоростью воды.

При малых скоростях движения потока в подъёмных трубах и вскипании воды в спускных не исключена возможность перемены направления циркуляции.

При восходящем движении циркуляционного потока направления движения воды и пара совпадают, и большая относительная скорость пузырей пара способствует циркуляции, увлекая за собой воду. При движении потока вниз, когда движения воды и пара не совпадают, пар, стремясь подняться, наоборот, тормозит циркуляцию.

Поэтому для осуществления циркуляции при нисходящем движении циркуляционного потока относительная скорость пара по сравнению со скоростью воды должна быть или очень мала, чтобы пузыри пара увлекались водой, т. е. абсолютная скорость их приобрела направление движения воды, или, наоборот, значительно превышать скорость воды, чтобы пузыри пара беспрепятственно поднимались.

В противном случае при парообразовании, если скорость движения воды вниз достигнет величины близкой обратно направленной ей относительной скорости пара, т. е. абсолютная скорость пузырей пара приблизится к нулю, возможно образование застоя пара и паровых пробок, что вызовет перегрев труб.

Причиной перегрева трубок является не малая скорость циркуляции, а образование застоя пара и паровых пробок в трубках, когда относительная скорость пара близка по величине и обратна по направлению скорости воды.

Такие аварии у котлов с замкнутыми циркуляционными контурами, особенно работающих в условиях, не подходящих по характеру производства, легко спутать с упуском воды. Пришлось встретиться с двумя случаями аварий, когда явный упуск воды был объяснен инспекцией опрокидыванием циркуляции, а нарушение циркуляции — упуском воды.

Конструктивным недостатком ланкаширских котлов является слабое прогревание воды в более холодной зоне со слабой циркуляцией воды под жаровыми трубами.

Котлы корнуоллийские со сдвинутой к одному боку жаровой трубой имеют лучшую циркуляцию.

Из других недостатков жаротрубных котлов обращают на себя внимание неравномерный нагрев в разных частях котла и жесткость его конструкции, вызывающие появление вредных напряжений и расстройство соединений, особенно в днищах и жаровых трубах, а также опасность перегрева и образования отдулин при

упуске воды и при попадании масла на жаровые трубы. В последнем случае труба перегревается сбоку, приблизительно под углом в 45° к колосниковой решётке, где имеет место наиболее сильное лучеиспускание и парообразование. Этим отличаются они от отдулин при упуске воды и осадках накипи, получающихся сверху.

Котлы с дымогарными трубами и огневыми коробками имеют много плоских стенок, которые требуют особого крепления загيبов у потолка топок, работающих в тяжёлых тепловых условиях, также трубные решётки с ввальцованными в них трубами, соединения которых легко расстраиваются и дают течь. От частой развальцовки получаются трещины между гнездами.

В стоячих (вертикальных) котлах нижний шов, соединяющий корпус котла с внутренней топкой по установке на плите при появлении течи невозможно подчеканить без подъёма или поворота котла набок, что связано с потерей времени. Для доступности нижнего шва рациональнее кожух корпуса удлинять вниз для образования зольника.

Слабым местом камерных горизонтально-водотрубных котлов являются ответственные, дорогие и сложные по изготовлению водяные камеры, составленные из плоских стенок, укрепленных связями с множеством отверстий для труб и лочков, в то же время эти камеры мало полезны по поверхности нагрева. Сварные камеры вызывают подозрительное отношение к ним, так как операции сварки средней узкой части камеры (обочины или окаймляющей полосы между передней и задней стенками) во время изготовления камер связаны с многочисленными частичными местными нагревами до сварного жара и охлаждениями то с той, то с другой стороны. Вварка, а также наклеп при постановке и чеканке связей в холодном состоянии, создает разнообразную структуру в разных местах камер, не поддающуюся исследованию, что в свою очередь вызывает преждевременное старение и хрупкость металла, так как камеры после сборки отжигу не подвергаются. Поэтому особенно задний сварной шов, по низу камеры обращенный к топке, должен быть надежно защищен от действия огня и требует особого наблюдения.

Недостатком клепанных камер является невозможность чеканки швов с внутренней стороны, отчего при неплотном прилегании соединения и головок заклепок создаются условия для разъедания и протекания.

Такой же опасности по сварному шву подвержены коллекторы пароперегревателей.

В подтверждение сказанного приводятся следующие факты.

При гидравлических испытаниях двух новых котлов у сварных камер на целом месте обочины были обнаружены выпотины и течи через волосные трещинки.

Микроснимки высверленных из этих мест столбиков железа показали, что материал во время изготовления претерпел нежелательные изменения структуры.

При осмотре котла Штейнмюллера по нижней кромке сварной передней камеры были обнаружены трещина и надрыв общей длиной около 500 мм. С таким повреждением котел работал, повидимому, долго, так как защитная обмуровка в пространстве между поддерживающей коробчатой балкой и камерой была пропитана жженым сахаром, попадавшим в котел с конденсатом.

На другом предприятии у котла такой же системы, постройки завода Борман, Шведе и К° 1897 г., с внутренней стороны по сварному шву низа передней камеры была обнаружена наплавка медного припоя, повидимому, по месту непровода, а с наружной стороны — автогенная заварка на длине 650 мм.

По заявлению старожилков завода, запайка медью была сделана при самой установке котла; с ней котел работал до 1929 г. на давлении 8 атм., а затем после автогенной заварки снаружи, вследствие расслоения шва горновой сварки, — при пониженном давлении.

Нельзя признать рациональной конструкцией жесткую и тяжелую штампованную ступенеобразную плиту, в уступах которой развальцовываются прямые кипятильные трубки вертикально-водотрубных котлов Гарбе. Причиной этого является возможность образования надрывов и трещин между трубными отверстиями.

Также нерациональны вследствие жесткости широкие патрубки, соединяющие в горизонтальном направлении между собой барабаны, в вырезках которых от тепловых деформаций образуются трещины. Последние особенно часто появляются в нижних барабанах от неравномерного прогрева воды при растопке, так как вода в необогреваемой части низа котла не участвует в циркуляции.

По той же причине и вследствие ударного действия холодной воды и неравномерного нагревания вообще в нижних барабанах наблюдаются искривления, расстройства швов и трубок, а также наружные разъедания. Поэтому внутри нижних барабанов между спускными и подъемными трубками ставят щиты для направления циркуляционного потока.

Установка котла должна обеспечивать свободное расширение во всех направлениях и допускать компенсацию тепловых деформаций. Поэтому необходимо учитывать действие расширения на опоры, на подвесное устройство и на обмуровку котла.

В противном случае они будут принимать дополнительную нагрузку, расстраивать швы и вызывать разрушения кладки. Во избежание подобных расстройств опоры и подвесы делать подвижными или скользящими, кроме одной — крайней, которая должна быть неподвижной. Не следует допускать также конструкций опор, которые от заноса золой и сажей при сырости превращаются в неподвижные. Поэтому необходимо обращать особое внимание, и проверять функционирование подвижных опор котла, так как при нарушении возможности скольжения от теплового расширения, особенно при отоплении мазутом, у водотрубных котлов появляются трещины поперек кипятильных трубок, а у жаротруб-

ных это способствует образованию морщин и надрывов на загибах отбортовок передних днищ и царг жаровых труб.

■ Неравномерное распределение на опоры полного веса котла с водой, а также недочёты установки и осадка фундаментов могут вызвать провес и прогиб котла. В связи с этим возникнут большие напряжения в определённых местах, вмятины и вдавливания листов, что сопровождается расстройством швов, появлением трещин и отжиманием листов весом котла при установке опор под внутренними обечайками меньшего диаметра.

Подвеска длинных барабанов лишь на концах недопустима. Барабаны, установленные на приклепанных кронштейнах и лапах, при больших расстояниях между опорами также могут деформироваться и прогибаться. Во избежание неплотностей и пропаривания заклепок вследствие трудности чеканки приклепка лап и ушков должна выполняться с особой тщательностью и уплотнением.

Опорные колонны поперечных балок каркасов для подвешивания барабанов на хомутах должны быть отнесены возможно дальше от внутренних сторон обмуровки, омываемой газами. При блочной установке котлов для средних колонн, во избежание прогиба от нагревания, должно быть предусмотрено воздушное охлаждение.

Неудовлетворительное прилегание перекрытий, ограничивающих газоходы, а также неправильная обмуровка на уровне или выше огневой линии вызывают, вследствие сильного нагрева неомываемой водой стенки, характерные внутренние пропаривания на уровне воды в котле и в паровом пространстве.

Кладка частей, соприкасающихся с котлом, должна вестись на глине, а подверженных высокой температуре — на шамоте. Применение известкового раствора недопустимо, так как известь разъедающе действует на железо.

При осмотре котлов обнаруживались глубокие, почти во всю толщину стенки внешние разъедания, которые пробивались молотком насквозь у верхнего барабана в местах соприкосновения с передним фронтоном, выложенным на извести и цементе.

Высота и объём топочного пространства должны быть достаточны, чтобы не затруднять развитие пламени, перемешивание газа с воздухом для достижения полного сгорания газов и частиц топлива при высокой температуре до соприкосновения с более холодной поверхностью нагрева, а также не должны допускать возможности дгорания газов и уноса топлива в дымоходах.

Дымоходы должны быть устроены так, чтобы не препятствовать движению газов, во избежание их взрыва, и не допускать образования мёртвых углов и тупиков, допускающих застой газов. Все части поверхности нагрева должны омываться потоком газов, иначе неиспользование поверхности нагрева повлечёт за собой нежелательные напряжения в стенках котла.

Наиболее сильное влияние на коэффициент теплопередачи конвекции оказывают скорость и характер движения газов. Повышение скорости увеличивает трение о стенки, порождает вихревое

турбулентное движение и перемешивание частиц газов. При медленном или ламинарном их течении частицы, соприкасающиеся с поверхностью нагрева и отдавая свое тепло, охлаждаются и образуют изолирующий слой между поверхностью нагрева и остальной массой газов. Перемешивание газов как бы разрушает этот изолирующий слой. Для достижения этого в дымоходах иногда устраивают заставляющие изменить направление газов перегородки и дефлекторы, искусственно вызывающие завихрение потока газов для перемешивания частиц и прижимающие их к стенкам котла. Недостатком перегородок являются заносы золы, трудность очистки и увеличение сопротивлений тяги.

Котёл, топка и дымоходы должны быть взаимно приспособлены и дополнять друг друга.

Несмотря на кажущуюся азбучность приведённых выше положений, за последние три года пришлось неоднократно участвовать в комиссиях по укреплению просевших колонн каркасов, например, у восьми котлов Бабкока в одном случае и у трёх котлов типа Стерлинга в другом.

С особо характерным случаем пришлось встретиться в июне 1941 г. Для замены выброшенного котла был установлен хорошо сохранившийся батарейный котёл — шестёрка с четырьмя кипятыльниками, 118 м² поверхностью нагрева, неизвестного происхождения и года постройки, у которого верхние барабаны, а также средние и нижние кипятыльники соединены между собой тремя штуцерами.

Особенности этого котла следующие. Нижние кипятыльники соединены со средними тремя штуцерами, как обычно расположенными по длине симметрично. У средних кипятыльников — три штуцера, соединяющие их с верхними барабанами, поставлены так, что передние штуцеры сдвинуты к передним днищам и находятся в обмуровке передней фронтальной стенки, а средние отнесены от передних на большее расстояние за середину по длине кипятыльников.

Судя по конструкции и расположению штуцеров, можно предполагать, что котёл на прежнем месте работы был обмурован при горизонтальных оборотах, так что средние кипятыльники приходились во втором газоходе, и был свободно подвешен на каркасе за имеющиеся лапы верхнего барабана.

В новом месте установки котёл обмурован с вертикальными дымоходами и кроме подвески за лапы на каркасе установлен на столбах под нижними кипятыльниками без скользящих опор, что уменьшило свободу расширения.

При такой обмуровке передняя часть средних кипятыльников оказалась в первом дымоходе над топкой, что обусловило затруднённый выход пара из средних кипятыльников в верхние барабаны и вызвало застой пара и образование паровых мешков между далеко поставленными друг от друга передним и средним штуцерами.

Несоответствие конструкции котла с обмуровкой в первые три месяца его работы повлекло за собой расстройство швов, а затем

постановку заплат по верху средних кипяtilьников между расставленными на большое расстояние штуцерами.

Как выход из положения, рекомендовано в промежутке между двумя передними штуцерами средних кипяtilьников, выводящими пар, поставить дополнительно по одному штуцеру или ввальцовать по три трубы, предварительно усилив стенки накладками для надёжности вальцовки. Верх же кипяtilьников над топкой предложено защитить обмуровкой или асбестом, а также под нижними кипяtilьниками сделать подвижные опоры.

Неоднократно приходилось обнаруживать превращение скользящих опор в неподвижные вследствие заноса их золой, что часто встречается у цельнокамерных котлов под задними камерами, а у вертикально-водотрубных — под нижними барабанами. Следствием этого являлось искривление кипяtilьных трубок, а у котлов ланкаширских и батарейных — опрокидывание опорных ступьев на ребро вследствие распирения котла. Опрокидывание ступьев вызывает образование вмятия и отжатие склёпанных между собой звеньев. Приходилось также сталкиваться с недопустимым завышением огневой линии над уровнем воды в целях увеличения поверхности нагрева. Пришлось даже расследовать такое «достижение», что для увеличения съёма пара и производительности продукции у котла Бабкока и Вилькокса устроили топку на всей длине кипяtilьных трубок, за исключением последнего — четвёртого хода, в результате чего при форсировке трубки были сожжены.

В заключение нужно отметить встретившиеся при проверочных расчётах неправильности формул, приведённых в руководствах.

1. В выводе формул Генника (G. Hönnicke, Handbuch zum Dampfkessel und Apparatebau, 1924 г., стр. 100) для подсчёта толщи-

ны фланцев
$$h_1 = 0,43 \sqrt{\frac{P' (R_o - R_n)}{k_n (t - d)}} \frac{t}{d} + 1,2$$
 сделаны непрерыв-

ные допущения в сторону увеличения результата, создающего большой запас прочности. При выводе формулы сгибающий момент принят $\frac{1}{4} P'l$ вместо $\frac{3}{16} P'l$, при этом l — плечо момента взята как разность между радиусом окружности болтов и внутренним радиусом корпуса аппарата $R_o - R_n$ вместо наружного радиуса R_n , то-есть разности $R_o - R_n$.

Кроме указанных допущений, увеличивающих толщину фланца, приняты надбавки, как например, на случай уменьшения деформации фланца от увеличения шага болтов, твёрдая прибавка $0,6125 \times 1$ см, хотя сам автор перед этим указывает, что толщина фланца достаточно надёжна, и, наконец, надбавка на увеличение толщины фланца, если последняя менее 25 мм. Вводя аналогичный расчёт при сгибающем моменте равным $\frac{3}{16} P'l$, где $l = R_o - R_n$, т. е. вычитая радиус наружной стороны, получается вполне достаточная, без ущерба для прочности, толщина фланца.

2. При расчёте стенок конических сосудов, подверженных

внутреннему давлению, ссылаясь на различные руководства, в том числе на «Детали машин» Берлова, пользуются формулой:

$$S = \frac{p D x}{2 K_x \varphi \sin \alpha} + c \text{ см,}$$

которую нельзя признать правильной.

В конических сосудах напряжения не одинаковы в различных сечениях и зависят от соответствующего диаметра и угла наклона. А priori, можно сказать, что напряжение в стенке конуса вдоль меньше, а поперёк больше, чем соответственное напряжение в цилиндре, имеющем диаметр, равный диаметру взятого сечения конуса.

Вывод даёт для продольного и поперечного расчёта стенок конического сосуда соответственно формуле:

$$S = \frac{p (D - \cos \alpha) x \cdot \sin \alpha}{2 K_x \varphi} + c \text{ и } S = \frac{p (D - \cos \alpha) x}{4 K_x \varphi \sin \alpha},$$

где: α — угол, образованный восстановлением перпендикуляра в точке конуса данного сечения с вертикальной осью.

Член $\cos \alpha$ при большом значении D влияния не имеет, а потому им можно пренебречь без особой погрешности.

При $\alpha = 90^\circ$, т. е. цилиндра, получаются обычные гамбургские формулы:

$$S = \frac{D p x}{2 K_x \varphi} + c; S = \frac{D p x}{4 K_x \varphi}.$$

Поперечный шов у конического сосуда находится в более тяжёлых условиях, чем у цилиндрического, при одном и том же диаметре.

Анализируя выведенные формулы, можно прийти к заключению, что при угле, равном 45° , должны получиться равные значения толщины при расчёте поперёк и вдоль, т. е.

$$S = \frac{p D x \sin \alpha}{2 K_x \varphi} = \frac{p D x}{4 K_x \varphi \sin \alpha},$$

откуда, произведя сокращения, получаем

$$2 \sin^2 \alpha = 1, \text{ или } \sin \alpha = \sqrt{1/2}, \text{ т. е. } \alpha = 45^\circ,$$

когда напряжения вдоль и поперёк равны, и толщина стенок получается наименьшая.

При углах, меньших чем $\alpha = 30^\circ$, напряжение в стенке поперёк будет больше напряжения вдоль, а при $\alpha = 0$ получится плоская стенка с соответствующим подходом расчётов.

Несмотря на широкое применение паровых котлов и на громадное их значение, а также большое впечатление, которое оставляют взрывы их, никаких специальных исследований процессов взрыва, поведения материала при разьединении стенок и внезапного перехода давления в котле к наружному атмосферному не производилось. Велись лишь расследования взрывов *post factum*, когда вся-

кие предположения и догадки как практические, так и теоретические могут быть и верны и ошибочны.

По характеру излома стенки явление взрыва носит динамический характер. Поэтому можно предполагать, что в момент разъединения стенки мгновенное выравнивание давления в котле с атмосферным и переход кипящей воды под давлением в паробразное состояние за счёт освобождающейся разницы тепло-

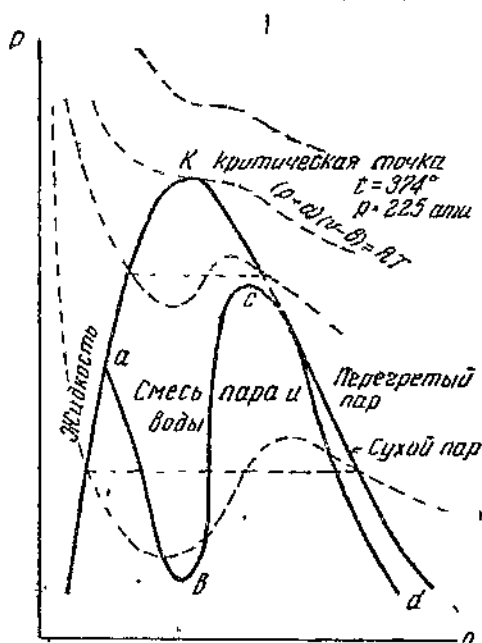


Рис. 3. Кривые Ван-дер Ваальса

содержаний происходит по кривой Ван-дер Ваальса $abcd$. Сначала падает давление от точки, соответствующей на левой предельной кривой жидкости до атмосферного, а затем повышается за предельное давление, что придаёт явлению характер динамичности. (Рис. 3).

НЕНОРМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПЛОХОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ КОТЛОВ

Повреждение и порча котлов зависят от ненормальной эксплуатации и условий их работы. Причины этих явлений могут быть следующие.

1. Чрезмерная форсировка, а вместе с ней унос мелких частиц и догорание их за топкой, что может привести к взрыву

газов в дымоходах, особенно при наличии присоса воздуха через трещины и щели обмуровки.

Кроме грызущего действия летящих, не догоревших, твердых частиц топлива на стенки, догорание их вызывает повышение температуры стенки и разъедание железа газами.

При неполном сгорании горючие газы при плохой тяге и длинном борове могут скопляться и застаиваться в дымоходах, а перемешиваясь с воздухом, образовывать смеси, близкие к гремучим. Скопившиеся смеси могут давать взрывы при растопке котла без предварительного вентилирования дымоходов, при временных остановках котла из-за заглущения огня слоем свежего топлива, при большой неполноте сгорания и плохого доступа воздуха, вследствие неправильного ведения топки с толстым слоем топлива и загрязнения колосников, а также при нефтяном отоплении, вследствие нераспыливания нефти и неправильного включения и остановки форсунки. Поэтому топочному пространству и дымоходам, во избежание застоя газов и ударного действия пламени, нужно придавать простую форму без мертвых углов и выступов.

На случай взрыва газов рекомендуется в высоко расположенных частях дымоходов устраивать предохранительные заслонки, открывающиеся наружу.

2. Быстрая растопка и остужение котла, вызывающие тепловые деформации при неравномерном расширении и сжатии его частей, последствием чего является расстройство и течь швов и развальцовки труб, вредные напряжения и трещины в малоэластичных соединениях элементов котла.

На практике при аварийных случаях для ускорения охлаждения котла прибегают к питанию холодной водой с частой продувкой через спускной кран. Также остужение допустимо только в крайней необходимости лишь при правильном устройстве ввода питательной воды, возможно медленном питании, для постепенного прогревания свежей воды и остывания стенок котла.

3. Неправильное устройство ввода питательной воды в холодную зону со слабо участвующим в общей циркуляции водяным объемом, что создает местные охлаждения и неравномерное распределение температур, особенно в котлах с большим объемом воды, вследствие плохой её теплопроводности.

Неравномерный прогрев воды вызывает сильные деформации и перенапряжения стенок, ведущие к расстройству соединений, особенно поперечных заклепочных швов, образованию течи в местах развальцовок, искривлению барабанов и появлению трещин в жестких соединениях элементов котла. Кроме того при неправильном питании в заднюю часть котла холодной водой с температурой ниже точки росы может получиться потение на поверхности нагрева и вызвать ржавление и внешнее разъедание стенок, особенно в присутствии SO_2 в дымовых газах от сжигания влажного топлива с содержанием серы.

По той же причине появления росы питание экономайзера не подогретой водой может повлечь сильный износ экономайзера, а также и тяговых устройств при низкой температуре уходящих газов.

Слой газов, непосредственно соприкасающийся с холодными стенками, может переохладиться по сравнению с более удаленными слоями и принять температуру стенки, зависящую от температуры воды, поступающей в экономайзер.

Температура точки росы, при которой начинается конденсация находящихся в дымовых газах водяных паров, определяется по их парциальному давлению, в свою очередь зависящему от объемного состава сухих газов и водяных паров в продуктах сгорания.

Поэтому правильное устройство ввода питательной воды в котёл для более быстрого нагрева поднимающимся паром и в целях вывода выделяющихся из неё газов в паровое пространство для отвода вместе с паром имеет большое значение. Учитывая это, конец питательной трубы рекомендуется располагать вдоль барабана немного ниже низшего допускаемого уровня воды (приблизительно на высоте огневой линии), чтобы в случае морчи питательного клапана не произошло опорожнения котла.

Для избежания гидравлических ударов, возникающих при обнажении питательной трубы во время сильных колебаний уровня, а также от пропускания и неплотного соединения флянцев, под питательной трубой устанавливают заполняемое поступающей водой корыто, из которого она переливается через края и перемешиваясь утопает в массе котловой воды.

В экономайзерах же во избежание потения стенок часть нагретой воды в них отводят обратно и подмешивают к поступающей свежей холодной воде.

В целях дегазификации и улавливания накипи питание производят посредством особых приборов, состоящих из ряда подвешенных в паровом пространстве одна над другой тарелок, расширяющихся книзу. Вода, поступающая на верхнюю тарелку, каскадами переливается с одной тарелки на другую через ряд отверстий, совершая зигзагообразный путь. При таком соприкосновении воды с паром происходят выделение газов из воды и отложение накипи на тарелках.

При питании котла в паровое пространство должно быть предусмотрено, во избежание получения влажного, сырого пара, надежное отделение его от воды.

Питательная вода—одна из главных причин износа котла, а потому рациональное надёжное питание и распределение воды внутри котла имеет важное значение, особенно в больших многометражных котлах высоких давлений, которые поэтому обычно снабжают автоматами непрерывного питания.

4. Плохое качество питательной воды, загрязнённой механическими примесями и растворёнными солями, а также насыщенной газами.

Общеизвестно разъедающее действие на стенки котла воздуха, углекислоты и кислорода, выделяющихся из воды, а также растворённых свободных кислот и легко растворимых солей хлористых и азотистых соединений. Сильно влияют на теплопередачу, перегрев стенок и образование отдулин или выпучки отложения ила, накипи и плёны от пригорания минеральных масел.

Растительные масла и животные жиры, плавающие в виде эмульсий, разлагаясь при высокой температуре на жирные кислоты и глицерин, покрывают стенки слоем, плохо проводящим тепло, и разъедающе действуют на железо. Соединяясь со щелочами, образуют мыла и пену, а также производят вспенивание воды в котле при содержании солей магния. Брызги воды в присутствии хлористых и азотистых соединений, а особенно хлористого магния, легко переходящего в соляную кислоту, дают разъедания в паровом пространстве.

Особенно вредно присутствие в питательной воде хлористых и азотистых соединений, вызывающих сильное разъедание, а также кремнистой кислоты (SiO_2).

В зависимости от качества воды и содержания в ней трудно-растворимых солей характер и состав накипи весьма разнообразны.

Углекислые соли кальция и магния, а также закиси железа и марганца, получаемые из обуславливающих временную жёсткость двууглекислых солей, при нагревании и по мере выделения углекислоты образуют рыхлые пористые осадки или карбонатные накипи весьма плохой теплопроводности.

Сернистый кальций (гипс) выделяется из воды при испарении в зависимости от концентрации и давления, а также от наличия других солей. Кристаллизуясь, он цементирует грязь и выпавшие из воды органические осадки, образуя твёрдую, плотную сульфатную накипь, окрашенную железистыми соединениями и органическими веществами в различные цвета.

Соединения кремневой кислоты и силикатов, выпадающих с накипью, сильно уплотняют последнюю, давая крепкий и прочно пристающий к стенкам котельный камень или силикатную накипь, которая обладает малой теплопроводностью и вызывает перегрев металла.

На сахарных заводах возможно попадание в котлы конденсата, содержащего сахара из варочных аппаратов.

Железо растворяется при температурах выше 100° в сахарных растворах, которые дают кислую реакцию. Разъедание тем значительнее, чем больше концентрация раствора и чем выше температура и давление. При больших попаданиях конденсата на стенках образуется слой жжёного сахара, плохо проводящего тепло.

Единичные случаи, наблюдавшиеся при освидетельствовании котлов сахарных заводов, показывают, что от попадания сахара наиболее страдает развальцовка труб, где сахар концентрируется и карамелизуется.

Пришлось расследовать причины взрыва газов в дымоходах, сопровождавшегося почти полным разрушением котельной, боров и части дымовой трубы, происшедшего, как выяснилось, от сильной форсировки трёх ланкаширских котлов, имевших выносные топки для сжигания торфа.

Интересно также расследование причин, вызвавших внешнее сплошное разъедание жаровых труб, особенно по низу полосой до 300—400 мм шириной, у 16 ланкаширских котлов металлургического завода. Котлы эти оттапливались неочищенным доменным газом, сжигаемым в выносных топках Люмнера с дополнительной колосниковой решёткой для подтопки углем и для запала газа.

Как установлено расследованием, в целях экономии на колосниках не забрасывалось достаточного количества твёрдого топлива для поддержания температуры топки, а потому при большой влажности топлива полного горения газа в топке не происходило, наличие же хлористых, сернистых, цианистых и роданистых соединений, а также летучей воды в соприкосновении с поверхностью нагрева вызвало разъедание железа.

У двухбарабанного котла Гарбе, постройки небольшого украинского завода, с барабанами, составленными из трёх отдельных плит Гарбе, и с интервалами между тремя секциями трубок, заложенными стенками, что разделяло топочное пространство на три отдельные топки, получались частая смена трубок вследствие искривления и разное стояние уровней воды. Намечалось много вариантов переделок, но ввиду недостатка времени для таких переустройств рекомендовалось: 1) очистить и переделать скользящую нижнюю опору, превратившуюся в неподвижную от заноса её золой; 2) устроить общую топку, выбрав разделяющие стенки между секциями труб, оставив их лишь над сводами для защиты поперечных швов верхнего барабана; 3) укоротить свод во избежание ударного действия пламени на трубки и 4) удлинить внутри верхнего барабана наставками подъёмные трубки для более свободного выхода эмульсии воды и пара ближе к уровню воды.

По теории американского профессора Парра о щелочной или каустической хрупкости, образование межкристаллических трещин ниже уровня воды приписывалось воздействию растворов едкого натра и соды.

Они выедали связь между кристаллами в местах перенапряженных за предел текучести, особенно проникая через неплотности соединений и заклепочные швы, где от нагрева концентрация щелочей увеличивалась и создавала благоприятные условия выеданию.

Такие трещины хрупкости характеризовались Парром тем, что они идут вдоль границ отдельных зерен, т. е. между кристаллами, и этим резко отличаются от транскристаллических трещин разъедания и усталости металла; последние, не считаясь с поверхностями, ограничивающими отдельные кристаллы, пересекали зерна поперек в любом направлении и не останавливались на этих границах.

Теория эта, однако, встретила в свое время возражения и была признана недостаточно убедительной.

Возможность возникновения в котлах концентрированных растворов основана лишь на предположении и на результатах опытов, произведенных при обстановке, отличной от существующих условий, происходящих в котле.

По здравому смыслу в питательной воде недопустимо высокое содержание щелочей и концентрированных растворов в котле не может быть, так как иначе нормальная работа котла была бы невозможна. Наличие высокой концентрации с выпадением из раствора твердых солей можно наблюдать лишь при нештатных авариях с выходом пара наружу, чего у здоровых котлов не должно быть.

Позднейшими исследованиями Schocder и Berk¹ (США) определено, что основное действие на образование межкристаллических трещин «каустической хрупкости» оказывают не щелочи сами по себе, а те примеси, которые встречаются в торговых сортах соды: карбонаты и силикаты (Na_2SiO_3), и особенно последние. Эти примеси оказывают сильное влияние на части, подверженные растягивающим и изгибающим усилиям. Микроанализ сломавшихся образцов показывает, что характерное влияние силикатов сказывается в виде значительного количества межкристаллических трещин. Основываясь на этом, можно говорить и о тепловом происхождении этих трещин, так как известно, что силикатная и карбонатная накипи являются плохими проводниками тепла и вызывают застой тепла в стенках, а щелочи развешивающе действуют на железо, особенно деформированное и перенапряженное.

На практике пришлось встречаться с несколькими случаями сильного воздействия едкого натра и соды на железо котлов.

В период империалистической войны в Москве в здании винной монополии был оборудован госпиталь, во время функционирования которого пять котлов Шухова, работавших на отопление, совершенно не чистились. В питательную воду добавлялся едкий натр без дозировки. При ликвидации госпиталя и постановке предприятия на консервацию котлы также не чистили, а лишь выпустили из них воду.

При реставрации котельной для промышленного предприятия в 1926 г. пришлось осматривать котлы как до их чистки, так и после удаления накипи и отложений. Кроме толстых скоплений шлама по низу были обнаружены фигурные отложения как массивные, так и тонкие, паутиннообразные из сцепившихся между собой мельчайших кристалликов, целиком заполнявших барабаны. Три котла были приведены в негодность сплошными, почти сквозными разъеданиями. Однако характерных щелочных трещин обнаружено не было. Образцы железа, взятые из барабанов котлов, при механическом испытании ничем себя не проявили.

¹) Вестник инженеров и техников, 1937 г., стр. 621.

В других случаях при неправильном пользовании щелочами с целью очистки воды также не наблюдалось специфических трещин каустической хрупкости. Замечено было только, что дальнейшее разьедание металла шло концентрически вокруг мест заварки.

Межкристалличность трещин не может служить доказательством только воздействия едкого натра на железо, такие же трещины могут образовываться даже при отсутствии питательной воды. Горячие газы также разрушают связь между кристаллами и вызывают трещины по границам зерен.

Трудная удерживаемость растворов воды и едкого натра в закрытых сосудах, стремление их проникнуть в щели и способность их по проникновении густеть и увеличивать свою концентрацию общеизвестна.

Характерен случай тяжелого воздействия щелочей, наблюдавшийся у ланкаширского котла поверхности нагрева в 100 м², построенной в 1928 г., работавшего в районе Бердянска на очень жесткой воде. Котёл, запрещённый в 1936 г. инспекцией к работе, был осмотрен мною в 1938 г. в целях установления возможности ремонта.

Очистка воды едким натром, содой и другими неизвестными реактивами, которые брали на-глаз, производилась в очистителе кустарного происхождения, сконструированном механиком-практиком. Результаты такой очистки воды достаточно характеризуются тем, что у котла за 7—8 лет его работы (с 1928 по 1936 г.) в 1932 г. были заменены жаровые трубы новыми, а деревянная обшивка градирни от пропитки реактивами получила белый цвет, не уничтожившийся в течение двух лет после прекращения очистки.

Котёл перед его осмотром был очищен от накипи, поскольку это было возможно, так как твёрдая накипь спаялась с железом. По явищу и по бокам корпуса и жаровых труб наблюдались сплошные глубокие разьедания, так что оставшаяся толщина стенки местами доходила до 5—6 мм при первоначальной толщине стенок корпуса в 16,5 мм и труб в 14 мм. Поперечные швы и головки заклёпок корпуса и соединения Адамсона жаровых труб вдоль и поперёк гребня сильно разьежены; после заварки они вновь были изьежены. По загибам отбортовок соединений днищ с корпусом по бокам с обеих сторон, а также по отбортовкам для жаровых труб имелись канавообразные разьедания длиной в 1 м. Разьедания заваривались два раза, но канавки вышли за пределы заварок. С наружной стороны жаровых труб по соединениям царг видны следы пропаривания и отложения солей. Характерных же трещин по Парру обнаружено не было.

За последнее время также всплыл интересный случай.

У семи 3-барабанных вертикально-водотрубных котлов с изогнутыми трубками поверхностью нагрева по 400 м², на давление 17 ат, после непродолжительной работы обнаружено появление трещин на накладках продольных швов, особенно нижних барабанов. Экспертная комиссия образование трещин объяснила каустической хрупкостью, т. е. по вине предприятия от условий эксплуатации.

При осмотре расклёпанного шва обнаружено множество как волосных, так и с расхождением краев надрывов и сквозных трещин на накладках и листах барабана между дырами заклёпок и от кромок до заклёпок. Отложений и выпада солей при открытии шва не наблюдалось. По журналу контроля водоподготовки и состава котловой воды натриевое число не выходило за пределы допускаемого.

По своему характеру надрывы и трещины получились во время операций сборки котла вследствие наклёпа, неправильной обработки и неудовлетворительной подгонки и клёпки. Наглядно выявлено плохое качество сборки: недостатки вальцовки и расхождение кромок склёпанного барабана до 3 мм, несовпадение, овальность и разделка заклёпочных отверстий, недостаточная приладка и сильная подгонка накладок, следы усиленной чеканки кромок. Сравнение результатов произведённого испытания материала накладок с заводскими первоначальными данными подтвердило это обстоятельство.

Проведённые дополнительные испытания на ударную вязкость, металлографические исследования, выявления характера трещин и химический анализ материала показали, что обнаруженные дефекты природные, а не получившиеся при эксплуатации.

Кроме холодного наклёпа при сборке котлов обнаруженные крайние стадии выделений в виде сетки по границам зёрен структурно свободного цементита и жёлтоломкость от присутствия меди, способствуя увеличению хрупкости, явились причиной получения низких показателей ударной вязкости.

Характер обнаруженных трещин межкристаллический, т. е. трещины хрупкости, но местами они пересекали зёрна поперёк, как трещины усталости и разъедания. Межкристаллическость не является доказательством воздействия щёлочи на железо; такие трещины, идущие вдоль зёрен, могут получаться даже без присутствия воды от застоя тепла и перегрева стёнки. Температура заклёпочного шва всегда выше, чем стёнки. В данном случае образованию трещин способствовала прослойка воздуха в зазорах, вследствие неудовлетворительной приладки склёпанных частей. Комиссия с представителем завода-изготовителя пришла к выводу, что смена барабанов равновелика изготовлению новых котлов, а потому целесообразнее постепенно заменять поверхность нагрева установкой новых котлов большей мощности.

Не входя в рассмотрение аварий от грубых нарушений правил эксплуатации по причинам упуска воды, чрезмерного повышения давления, разрыва паропроводов и вентиляей, гидравлических ударов, оставления посторонних предметов в котле, обвалов и скоплений накали, попадания масла и кислот в котёл, ударного действия пламени на стёнки, обвала обмуровки, расстройств соединений, от быстрого охлаждения стенок, взрыва газов в дымоходах, перегревания экономайзера и взрыва перегревателя, последствия

которых общеизвестны, к обычным эксплуатационным повреждениям следует отнести разъедания, трещины и отдулины.

Разъедания наблюдаются там, где происходит окисление кислородом, кислотами и щелочами. Они могут быть наружными и внутренними, смотря по тому, где происходят — на поверхности или со стороны, омываемой газами или водой.

Внешнему разъеданию подвергаются части котла, имеющие течь и пропаривание вследствие неплотности соединений и швов.

Весьма неприятное впечатление производят разъедания от подтекания арматуры, лазов, люков, фланцев и пр., от заливки золы и шлаков у котла вследствие образовавшейся сырости и вредных соединений.

Особенно опасны, вследствие малой доступности для осмотра, разъедания в местах соприкосновения стенок котла с кладкой от сырости в дымоходах и обмуровке от присутствия грунтовых вод.

Во избежание ржавления от сырости обмуровки рекомендуется прокладывать железные листы между котлом и кладкой.

Ржавления и разъедания вызываются также потением стенок и конденсацией водяных паров отходящих газов, особенно же содержащих сернистые соединения при плохой циркуляции в последних дымоходах и питании холодной водой при температуре ниже точки росы.

Нельзя придавать исключительного значения гидравлическому испытанию и предполагать, что котёл, выдержавший такое испытание, обеспечен от взрыва. Гидравлическое испытание не может служить гарантией безопасности, оно является лишь средством для определения герметичности и плотности швов и соединений.

Часто наблюдалось, что у котлов, выдержавших испытание, стенки в местах внешних разъеданий в соприкосновении с кладкой пробивались ударом молотка.

Внутренние разъедания наблюдаются в виде раковин, оспин, бороздок, которые часто сливаются и переходят в сплошные. Окисление металла зависит от качества материала, состава питательной воды, скорости циркуляции и механических деформаций.

Разъедания различают также по месту их образования.

Осповидные разъедания встречаются в котлах и в местах слабой циркуляции.

Воздух, кислород и уголекислота, выделяясь из воды при нагревании в виде пузырьков, при слабой циркуляции пристаю к стенкам и образуют разъедания. Энергичные циркуляционные потоки вдоль стенок противодействуют разъедающему действию и, смывая пристающие к стенкам газы, а также увлекая взвешенные частицы накилеобразователей, не дают им отлагаться на стенках. Скопления отложившихся накипи и грязи производят разъедания, особенно в районе спускного крана, где более холодное состояние этого места усиливает вредное влияние. Свободные кислоты разъедают стенки на уровне воды.

Разъедания в паровом пространстве встречаются реже. Они могут происходить от оголения поверхности и обогревания стенки огнём и газами, а также от брызг воды в присутствии хлористых и азотистых соединений, особенно же хлористого магния, легко переходящего в соляную кислоту. Последняя, увлекаемая паром, непосредственно действует на стенки.

Активность действия кислот, щелочей, кислорода, а также углекислоты, с повышением температуры и давления возрастает.

Интересен ещё мало изученный вопрос о железе котла, особенно кипячительных трубок, находящихся в присутствии продуктов горения, горячей воды и пара под высоким давлением. При этих условиях не исключена возможность, с одной стороны, выгорания углерода, а с другой — вытеснения водородом железа, когда водородные ионы выделяются под влиянием железа, поддающегося разъеданию.

Ввиду отсутствия закономерности в характере разъеданий степень ослабления стенки необходимо определять, в каждом отдельном случае исходя из расположения разъеданий.

Разъедания и всякого рода утонения стенок котла нарушают прочность по продольным швам. Так как по целому месту листа имеется запас толщины, то оставшаяся толщина стенки при сплошных разъеданиях и неповреждённых продольных швах может быть допущена без снижения давления до величины $s\phi$, где s — первоначальная толщина, а ϕ — коэффициент ослабления шва, принятый при расчёте.

Отдельные осповидные разъедания глубиной более 2—2,5 мм во избежание дальнейшего углубления рекомендуется заваривать. Однако прodelьваемая иногда по низу котлов сплошная наплавка мелких разъеданий едва ли может способствовать повышению прочности вследствие возможности изменения структуры нагреванием и термическими напряжениями. Трещины образуются в местах, перенапряжённых механическими, термическими и химическими воздействиями на материал.

Характер и происхождение трещин, образующихся в стенках частей котла, различны.

По внешнему виду их можно разделить на внезапно и постепенно образовавшиеся, с деформацией металла и без неё, происшедшие от внешних усилий или воздействий и от внутренних напряжений.

Трещины, внезапно образовавшиеся после деформации, когда напряжения превысили временное сопротивление и предел текучести, сопровождаются удлинением и поперечным сжатием.

Излом частей котла от превышения временного сопротивления возможен лишь в исключительных случаях.

Обычно разрушение обогреваемой огнём стенки, подверженной давлению, происходит от потери прочности вследствие застоя тепла и перегрева до краснокалильных цветов на месте возникшей отдушины или выпучины при упуске воды или при внутреннем за-

грязнении. Такие трещины характеризуются большим сужением поперечного сечения или утонением стенки по месту выпучины.

Трещины без деформирования, мгновенно образовавшиеся, имеют излом зернистого строения и кромки поверхности, не втянутые внутрь, т. е. без поперечного сужения от деформации.

Такие трещины возникают под влиянием внутренних напряжений при потере вязкости и пластичности, от предварительного деформирования при механической обработке наклёпом, бортовкой, чеканкой и пр., от старения и быстрого охлаждения.

У постепенно прогрессирующих трещин на поверхности вначале появляются местные разрушения в виде морщин, надрывов и надломов. Поверхности излома этих трещин во время службы притираются и сглаживаются от вибрирования и прижимания друг к другу, а также разъедаются агрессивной средой, вследствие чего надрыв постепенно распространяется, углубляясь внутрь металла.

По данным Парра, Баумана и Гильома, изучение трещин в котлах привело к подразделению их на три вида: трещины от разъедания, от усталости и от хрупкости. Они существенно отличаются друг от друга и легко распознаются при микроскопическом исследовании.

Трещины от разъедания распространяются по направлению линий сдвигов, возникающих от деформирования при напряжениях, превышающих предел текучести, где внутреннее сцепление металла ослаблено. Поэтому разъедающая жидкость, растворяя металл, углубляется внутрь, т. е. трещины идут поперёк зёрен.

Таким же образом, не задерживаясь у границ зёрен, а пересекая их поперёк в любом направлении, располагаются трещины усталости, получающиеся в металле, подверженном меняющимся нагрузкам при переходе за предел усталости.

В противоположность указанному трещины хрупкости идут без исключения вдоль границ отдельных зёрен, т. е. являются межкристаллическими.

Такое разделение образования трещин едва ли логично. В паровых котлах при наличии возможности разъедающего действия воды и продуктов горения трещины от усталости и хрупкости образуются совместно с влиянием коррозии. Поэтому трещины, возникающие от одновременного действия напряжений и агрессивного действия среды, можно разделить на два основных типа: интеркристаллические и транскристаллические.

Возможно образование и промежуточных форм трещин (пересекающих зёрна и идущих по их границам).

В материале котла при наличии давлений, напряжений, наклёпа и тепловых деформаций от действия питательной воды и горячих газов могут образоваться межкристаллические трещины в зависимости от величины напряжений, качества материала, состава среды, концентрации раствора и температуры. Интенсивность их разрушения может повышаться в отдельных пунктах в зависимости от местных перегрезов стенки

Транскристаллические трещины, вызываемые усталостью, зависят от переменных деформаций и коррозий, усиливающих друг друга.

Разъедающее действие зависит от образования плотно пристающей плёнки окислов. При статических напряжениях эта коррозионная плёнка затрудняет процесс разъедания, а когда она повреждается и ломается переменными деформациями, то химическое действие переносится на оголившийся металл.

Наиболее часто трещины и надрывы наблюдаются:

1) у кромок разных отверстий — люков, лазов, трубных решёток, вырезов для патрубков и разного рода соединений;

2) по заклёпочным швам, особенно подверженным действию огня, между заклёпочными отверстиями, от кромок до заклёпки и за заклёпку; у кромок швов от чеканки, а также по самым заклёпкам;

3) по загибам отбортовок, особенно днищ, разных отфлянцовок, соединений жаровых труб и огневых коробок;

4) по целому месту листов вследствие неправильной подвески котла, перегрева, разъеданий, неравномерных тепловых расширений, сжатий и т. п.

Трещины и надрывы могут получаться в зоне ввода питательной воды в результате дополнительных напряжений, когда струя более холодной воды ударяет в стенку или в соединение.

Трещины, в зависимости от характера их образования, места и числа, обычно завариваются с обязательной засверловкой их концов. Однако нужно иметь в виду, что в результате сварки, особенно аргоновой, возникают напряжения. Для устранения их и улучшения структуры наплавленного и основного металла по месту сварки нужен отжиг всего изделия или детали, что сделать невозможно. Это обстоятельство является общим недостатком сварных швов и заварок.

Надрывы, складки и морщины, являющиеся предвестниками трещин по загибам днищ и отбортовкам царг жаровых труб, при невозможности замены их новыми также можно заваривать для продления работы котла. Однако заварка не вполне оправдывает себя, так как надрывы после заварки стремятся углубляться и удлиняться.

Приклёпка для укрепления сводчатых днищ к корпусу ланкаширских котлов косынками и кронштейнами, как показал опыт, расстраивает швы корпуса.

По швам внахлёстку горновой сварки царг, от непровара во время их изготовления могут получаться расслоения и надрывы, разрывающиеся с течением времени котловой водой.

Особенно опасно образование расслоений и трещин по сварным швам камер водотрубных котлов.

Сварные швы царг жаровых труб должны размещаться вразбежку по низу трубы вне ударного действия пламени, а кройки

камер, особенно выходящие в топку, — тщательно защищаться от действия лучеиспускания.

Казалось бы, что такое положение общезвестно, но часто приходилось встречать жаротрубные котлы кустарного изготовления со сварными швами царг, расположенными по верху и даже не вразбежку.

За последнее время пришлось расследовать три случая разрыва ланкаширских котлов при гидравлическом испытании: 1) по направлению оси верхнего лаза вдоль корпуса, 2) по горизонтали между жаровыми трубами днища и 3) по продольному заклёпочному шву корпуса.

Во всех этих случаях было установлено, что гидравлическое испытание производилось питательным насосом вместо пресса; это, как можно предполагать, и обусловило появление гидравлических ударов. Причем нужно отметить, что разрыву в первом случае способствовали неправильное расположение лаза длинной осью вдоль котла, надрывы кромок и нездоровая структура; во втором — возможная натяжка днища от переключки для выправления выпучин на жаровых трубах в прошлом, и в третьем — чеканка швов под гидравлическим давлением.

Выпучины или отдушины образуются в обогреваемых огнём топочных листах вследствие перегрева стенки от застоя тепла. При обнаружении выпучин необходимо установить причину образования их. Выпучины обычно получаются из-за упуска воды, внутренних загрязнений стенок, уменьшающих теплопроводность и оставления в котле посторонних предметов, а также из-за перегрева в местах ударного действия пламени, концентрированного нагрева, неправильной конструкции топки или, неудачного расположения сводиков, аккумулирующих тепло, и из-за образования паровых мешков вследствие нарушения циркуляции, отвода тепла и охлаждения стенки водой.

Незначительные выпучины обычно не выправляют, а следят за их состоянием и предохраняют от загрязнения накипью. Выпучины со значительными стрелами прогиба необходимо выправлять, если же это невозможно, то места выпучин вырубают и ставят заплату.

Плёны нарушают внутреннюю связь металла, уменьшают прочность и теплопроводность. Как указывалось ранее, в литом железе плёны получаются вследствие недостаточной проварки при прокатке листов, а в сварочном — от присутствия шлаков.

Если плёны находятся в топочных листах, то они вызывают перегрев металла и образуют односторонние отдушины, а затем трещины. Плёны, расположенные глубоко и параллельно поверхности листа, если последний не подвергается непосредственно действию пламени, часто остаются незамеченными и не приносят вреда.

Плёны, расположенные под углом и оканчивающиеся на поверхности листа в виде заусениц и расслоения, срубают, если остающаяся толщина листа достаточна, или место с плёной вырубает и ставят заплату.

Заплаты на заклёпках обычно ставятся изнутри, чтобы давление пара прижимало к стенкам, или ввариваются по пригонке к отверстию двусторонним сварным швом.

Удовлетворительные результаты дала, как показала практика, заделка ненужных отверстий накладками изнутри с обваркой швов внахлестку с обеих сторон при условии, чтобы края накладки заходили за края отверстия не менее 30 мм.

Наблюдались следующие характерные случаи.

При освидетельствовании трёх горизонтально-водотрубных котлов Фицнера и Гампера замечены были следы пропаривания швов.

Оказалось, что, несмотря на приложенное к котельной книге заводское описание котлов, изготовленных на рабочее давление в 10 ат., работали на 12 ат. по требовавшемуся давлению для паровой машины, что было санкционировано инспектором.

У вновь установленного пятибарабанного котла Шухови, постройки 1937 г., на трубных решётках передних коллекторов получились выпучивания со стрелами прогиба до 35—50 мм, искривлённость труб и расстройство развальцовок.

Местная экспертная комиссия определила, что причиной указанной аварии послужило нарушение циркуляции и образование паровых мешков от прогревания задних концов труб вследствие незаложенных при монтаже проходов между пучками труб в первом ходу. Однако такая причина вызвала сомнение, так как свободный проход газов между пучками не мог сильно повысить температуру во втором ходе и повлиять на циркуляцию после прохода через перегреватель, а мог лишь оказать влияние на температуру уходящих газов.

Дополнительное расследование показало, что котел не форсировался и паросъём был около $10 \text{ кг/м}^2\text{-час}$, авария же произошла от выпуска воды ниже передних коллекторов. После такого понижения уровня стали питать котел водой.

Проделанное по предписанию местной инспекции металлографическое исследование железа решёток дало удовлетворительные результаты, но было получено характерное заключение: «ввиду того, что металлографическое исследование не гарантирует выявления нарушенного предела упругости (линий Людерса), решётки признаны порочными». Однако в чем заключалась порочность решётки, не указывалось. Рекомендовано решётки выправить при надлежащем нагреве с последующим отжигом.

Интересна авария, граничившая со взрывом комбинированного котла Тиллбейна с двумя уровнями воды, происшедшая по причине выпуска воды и последующего питания водой.

У нижнего ланкаширского котла левую жаровую трубу сильно смяло по всей длине. В некоторых местах ее совершенно сплюснуло, в средней части отдавило к корпусу котла, так что труба приняла корытообразную форму, срезав заклёпки поперечных соединений, а борт левой горловины заднего днища отогнуло. Правая жа-

ровая труба деформировалась меньше, у нее были лишь расстроенные соединения звеньев.

Было установлено: котел продолжительное время оставался без надзора, вернувшийся кочегар закачал воду, водомерное стекло отсутствовало, работали по водопробным кранам. Вместе с тем явилось подозрение на умышленный выпуск воды через продувной кран во время отсутствия кочегара; спускная линия оказалась исправной. Верхний трубчатый котел не пострадал.

При чистке котла и отбивании накипи острыми инструментами могут получаться повреждения стенок в виде насечек и зарубок, к которым пристаёт плотнее накипь. Такие поверхностные зарубки могут служить причиной образования трещин и разъеданий, особенно в местах перенапряжений и деформаций. Отбивая накипь во избежание расстройства швов, следует ударять не по головкам заклепок, а между ними.

Наблюдались случаи, когда образцы котельного железа, взятые для механического испытания, давали хорошие результаты на разрыв и удлинение. По имеющимся же зарубкам и насечкам, полученным при чистке, образовывались трещины при испытании на холодный изгиб, а после опиловки деформированного места хорошо выдерживали эту пробу.

Спускать воду до начала очистки не следует, во избежание затвердения накипи ее необходимо спускать постепенно, по мере очистки поверхности.

Для борьбы с накипью в котле и для отделения и размягчения ее применяют различные противонакипные средства. Все эти средства далеко неравноценны. Они могут затрясать котел, давать клейкие осадки, а главное, создавать обвалы и скопления кусков накипи на обогреваемых местах и вызывать перегрев стенок и образование отдулин.

Универсальность и пригодность патентованных средств, так называемых «антинакипинов», для всякой воды сомнительны и даже опасны.

Очистку питательной воды предпочтительнее производить до поступления ее в котел.

При расследовании взрывов экономайзеров и перегревателей иногда бывает трудно установить причину происшедшей аварии (от газового взрыва в дымоходах, вследствие неполноты сгорания и застоя газов или парового взрыва, вследствие чрезмерного повышения давления).

Так например, при выяснении причины взрыва коробки перегревателя при растопке у ланкаширского котла на одной из фабрик у высокоавторитетной комиссии, возглавлявшейся проф. А. П. Гавриленко, В. И. Гриневецким и К. В. Киршем, получилось разногласие относительно причин взрыва, а именно: два члена комиссии из десяти считали причиной аварии взрыв газов в камере перегревателя, двое находили взрыв самого перегревателя и шесть членов объясняли разнос перегревателя чрезмерным повышением давления,

но вызванным и облегченным предварительно взрывом газов. Таким образом, вопрос о причине аварии остался не вполне решенным¹.

Расследование аналогичного случая на другой фабрике подтвердило, что взрыв был паровой, вследствие заполнения конденсатом из паропровода разогретого перегревателя, оставленного при растопке котла без воды².

Нельзя обойти молчанием несознательное отношение к кустарным переделкам и ремонтам котлов своими силами.

С наиболее показательным случаем пришлось встретиться на крупном заводе.

В котельной завода установлено 14 котлов Фербена, по семи котлов фронтом против фронта.

Намечалось укоротить несколько котлов на одно первое звено корпуса и соответственно этому и жаровые трубы, чтобы на освободившиеся места поставить выносные экранированные толки, без чего вследствие недостаточного расстояния между фронтами выполнить было невозможно.

Для осуществления намеченной работы была приглашена артель котельщиков. Котлы частично были размурованы и под несколькими из них вырыты глубокие ямы для возможности размаха молотком снизу вверх при переклепке вручную, не переворачивая котлов.

На выраженное сомнение о целесообразности такой переделки с удалением хорошей по паросъему поверхности нагрева котлов и о возможности справиться своими средствами с переклепкой при большой толщине стенок корпуса котлов 25 мм, а днищ и диаметра заклепок около 30 мм и вообще с намеченной работой по подгонке жаровых труб, встретились возражения.

Рекомендовал передать переклепку котлов близлежащему большому котельно-механическому заводу, изготовителю этих котлов. Вызванный заведующий котельным цехом этого завода, отказавшись принять заказ на переклепку котлов на месте, также подтвердил невыполнимость переклепки своими силами и нецелесообразность переделки. Большой трудности стоило переубедить и доказать, что проще и дешевле передвинуть котлы назад, расширив котельную за счет хозяйственных помещений.

На другом заводе инспекцией была предписана переклепка поперечных швов двух верхних барабанов горизонтально-водотрубного котла Бабкока и Вилькокса. Такую операцию предполагали произвести путем сдвига царг на ширину поперечных швов за счет уменьшения длины барабанов, не снимая их с каркаса. Внутренние кромки поперечных швов внахлестку были расстроены неправильной чеканкой, кромки же с наружной стороны повреждены не были.

¹ Известия Московского общества надзора за котлами № 4, 1913 г. стр. 67 — 71.

² Иванов В. В. „Случай разрыва перегревателя“. Безопасность и гигиена труда. № 11, 1929 г.

Решили срубить, поскольку возможно, кромки швов, а если будет нужно, то в двух-трех местах сделать наплавку и заново прочеканить швы.

В большинстве случаев приходится устанавливать, что при ремонте котлов приглашаемыми кустарями-котельщиками заклепочные дыры не сверлятся, а пробиваются медведкой, а также часто бортовка и загиб листа производятся, при недостаточном нагреве. Такой ремонт не улучшает, а лишь ухудшает состояние котла.

Из последних встретившихся случаев во время печатания брошюры обратил на себя внимание проделанный ремонт, ухудшивший общее состояние горизонтально-водотрубного котла типа Фицнер и Гампер, постройки 1930 г. поверхностью нагрева 250 м^2 , на давление 15 атм. У подвешенного на двух опорах верхнего барабана $D = 1400 \text{ мм}$ и $L = 7280 \text{ мм}$, состоящего из трёх звеньев с заклепочными швами — поперечными внахлестку и продольными с двумя накладками, вследствие течи швов от прогиба барабана после многократной чеканки и постановки заплат среднее звено было заменено новым. Поставленное звено, сваренное впритык из двух обечайек со сварными швами вдоль вразбежку, было вварено поперечными швами между старыми крайними звеньями барабана.

Вварка была согласована с инспектором, при этом последним было предложено для разгрузки напряжений от изгиба усилить жёсткость вваркой изнутри на ребро двух колец $1400 \times 20 \times 150 \text{ мм}$ посредине сваренных царг нового звена.

По условиям военного времени ремонт не закончен — остались неприклёпанными частично отклёпанные для вварки звена накладки продольных швов крайних звеньев и утрачены данные о качестве материала, электродов и их обмазке, квалификации сварщика и проверке сварки.

Новый сменившийся инспектор отказался принять неоформленный ремонт и предложил удалить приваренные кольца жёсткости и поставить поперечным сварным швам вваренного звена накладки на заклёпках.

По наружному осмотру сварные швы с подваркой со стороны вершин выполнены удовлетворительно.

Такую замену вваркой звена и сочетание с клёпаными швами нельзя признать удачной, как и приварку колец жесткости с обеих сторон сплошными швами без промежутков, которая отохла и ослабила металл. Эти кольца едва ли соответствуют назначению по разгрузке напряжений изгиба, а только ухудшат эксплуатацию, способствуя отложению накипи и застою тепла. Удалить все кольца, а равно проделать приклёпку накладок со стороны воды по поперечным сварным швам, как рекомендует инспектор, без ущерба для качества материала и сварки невозможно.

Целесообразнее предусмотреть постановку промежуточной средней опоры для подвески барабана на приклёпанных лапах с серьгами ввиду обогрева низа барабана. Считаясь с такою действительностью: неудачно произведённым ремонтом и неудовлетворитель-

ной работой в прошлом, нельзя рассчитывать на продолжительную службу котла, особенно в новых проектируемых условиях форсированной работы и паропроизводительности до 11 т/час при устройстве окрашенной топки.

Можно говорить лишь об использовании котла на нефорсированной работе со съемом пара 5 т/час, как работал до ремонта, в зависимости от результатов исследования швов или восстановления данных о качестве произведенной сварки и удовлетворительного поведения швов при гидравлическом испытании.

Все приведённые случаи указывают на необходимость консультации и контроля по производимым ремонту и переделкам котлов.

Характерен вывод проделанного лабораторного исследования материала сменного среднего звена. Механическое испытание на разрыв дало удовлетворительные результаты. Пробы на удар не производилось. Металлографическое исследование и химический анализ показали, что сталь малоуглеродистая, полураскисленная. При травлении выявилась широкая зона центральной ликвации и заваренные при прокатке пузыри.

«Механические свойства характеризуют сталь с большой способностью к пластической деформации. От длительной работы в области высоких температур развились образования структурно свободного цемента. Признаков хрупкости, свойственной стали со структурно свободным цементом, не наблюдается».

С таким выводом согласиться нельзя. Рабочая температура стенки котла не соответствует температуре образования структурно свободного цемента; выделения его могли произойти лишь во время производства стали. Для суждения о хрупкости недостает пробы на удар. Эта же сталь другой лабораторией признана неудовлетворительной. К выводам лабораторий нужно относиться критически.

ЛИТЕРАТУРА

- Бабошин А. Л., Металлография, ч. I, II, III, 1917.
 Тамшан G., Lehrbuch der Metallkunde, 1932.
 Ulrich M., Werkstoff-Fragen der heutigen Dampfkesselbaues, 1933.
 Обергоффер П., Техническое железо, ч. I и II (перевод), 1933/34.
 Кащенко Г. А., Металлография, ч. II, 1935.
 Одинг И. А., Прочность металлов, 1935.
 Михайлов-Михеев П. В., Металл в современном котлотурбостроении, 1937.
 Предтеченский А. А., Вопросы прочности элементов парового котла и их соединений, 1935.
 Иванов В. В., Паровые котлы и техника безопасности котельных установок, 1931.
 Иванов В. В., Металлографическое исследование в применении к испытанию материалов паровых котлов, "Труды 1-го Всесоюзного научно-технического съезда", 1924 г., "Вопросы труда", 1926.
 Sprackhauser-Schneiders-Rüster, Die Dampfkessel, 1924
 Проблемы безопасности в эксплуатации котельных установок, Сборник статей, 1928.
 Шретер В. Н., Паровые котлы, 1938.
 Депп Г. Ф., Паровые котлы, 1908.
 Кнорре Г. Ф. и Семенов-Девятков И. Д., Курс паровых котлов, ч. I, 1934.
 Гавриленко А. П., Паровые котлы, 1907.
 Stead E., Migratory Habit of Solids in Alloy The Iron and Steel Metallurgist and Metallographist, № 2, 1904.
 Бабошин А. Л., Структурно свободный цементит в мягкой стали, ЖРМО, 1915.
 Бабошин А. Л., Отжиг бандажей, ЖРМО, 1913.
 Бабошин А. Л., Влияние отжига на структуру доэвтектоидной стали, ЖРМО 1915.
 Иванов В. В. К вопросу о причинах изменений структуры железа паровых котлов, "Гигиена и безопасность труда", № 5, 1925.
 Он же, О горновой сварке камер водотрубных котлов, тот же журнал, № 3, 1930
 " Щелочная хрупкость железа, тот же журнал, № 12, 1927.
 " Об изготовлении химической аппаратуры, тот же журнал, № 11, 1930.
 " Случай взрывов газа в дымоходах, тот же журнал, № 5, 1929.
 " Случай взрывов коробок пароперегревателей, тот же журнал № 11, 1929.
 " Расчет стенок конических сосудов (аппаратов Генце), подверженных внутреннему давлению, "Спирто-водочная промышленность", № 2, 1937.
 " К вопросу о влиянии структурно свободного цементита на механические свойства железа паровых котлов, "Вестник металлопромышленности", № 4, 1938.
 " "О влиянии доменного газа при сжигании его под паровыми котлами", Михайлов-Михеев П. В., "Качественная сталь", № 3, 1935.
 Михайлов-Михеев П. В., "Вестник металлопромышленности", №№ 6 и 8, 1932 и № 6, 1933.
 Stroemeier, The ageing of mild steel, "Iron and Steel Institut", № 1, 1907.
 Афанасьев Н. Н. О причинах возникновения трещин в котле, "Вестник инженеров", № 6, 1938.
 Афанасьев Н. Н., Механизация кристаллизации перлита в стали, "Металлург", № 4, 1938.
 Туляков, К вопросу о хрупкости металлов при низких температурах "Металлург", № 7/8, 1938.
 Ларичев В. А. и Раков Н. А. Современные требования к теплоустойчивым и жароупорным сталям в котлостроении, 1940.