

## Раздел 1. СВАРИВАЕМОСТЬ (ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ).

### 1.3 Чугуны

Чугун — самый распространенный литейный сплав железа с углеродом (углерода по массе более 2,1 %). Он имеет ряд положительных свойств, основными из которых являются: хорошие литейные свойства, малая чувствительность к концентраторам напряжений, способность гасить вибрацию и хорошая обрабатываемость. Чугуны имеют удовлетворительную коррозионную стойкость во многих агрессивных средах и жаростойкость, а также не подвержены значительному короблению в условиях повышенного нагрева.

Избыточный углерод, содержащийся в чугуне, существует в виде включений графита или химического соединения. Количество графита, форма, размеры и характер распределения его в металлической матрице оказывают преобладающее влияние на механические свойства чугунов. По степени графитизации чугуны подразделяют на белый, серый, высокопрочный и ковкий.

Свойства чугуна улучшают путем введения в него легирующих элементов, оказывающих благоприятное влияние не только на металлическую основу, но и на форму, размеры графитных включений, способствующих значительному измельчению структуры чугуна.

Нелегированным считают чугун, содержащий до 3,5-4,0 кремния, до 1,5-2,0 марганца, до 0,3 фосфора, до 0,25 серы и до 0,1 % хрома, никеля или меди (отдельно). В низколегированном чугуне суммарная массовая доля легирующих элементов (хрома, никеля, меди) не превышает 1,0-1,5 %, в среднелегированном она может достигать 7 %, а в высоколегированном превышает 7-10 %. Добавки сотых долей процента магния, натрия, бора считают легирующими.

Белый чугун. Белыми называют чугуны, в которых весь углерод находится в связанном состоянии с железом в виде цементита. Он имеет высокую твердость и хрупкость и трудно поддается обработке режущим инструментом. Как правило, эти чугуны перерабатывают в сталь, поэтому их называют передельными.

**Серый чугун.** Серые чугуны маркируют буквами СЧ и цифрой (СЧ 10, СЧ 15-СЧ 45), которая обозначает предел прочности при растяжении  $\sigma_B$ . Согласно ГОСТ 1412-85 в них нормируют также твердость (143-298 *НВ*) и химический состав с указанием массовой доли таких элементов, как углерод (2,9-3,7 %), кремний (1,0-2,6 %), марганец (0,5-1,1 %), сера (0,12-0,15 %) и фосфор (0,2-0,3 %). Чем выше цифра в обозначении марки чугуна, тем выше предел прочности на растяжение и ниже массовая доля

углерода, серы и фосфора в нем. В сером чугунае углерод находится в свободном состоянии в виде графита пластинчатой формы, который располагается в ферритной, перлитной или ферритно-перлитной матрице. Структура чугуна, а следовательно, и его свойства во многом определяются скоростью охлаждения: с ее уменьшением увеличиваются графитные включения, укрупняется зерно металлической основы, снижаются прочность и твердость. Серый чугун мало пластичен и вязок, но легко обрабатывается резанием, применяется для малоответственных деталей и деталей, работающих на износ, так как ему присущи антифрикционные свойства. Так как углерод в нем находится преимущественно в свободном состоянии в форме пластинчатого графита, то на изломе данный чугун имеет серый цвет (Рис. 1).

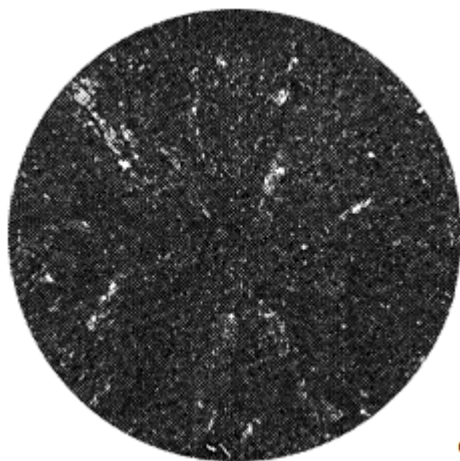
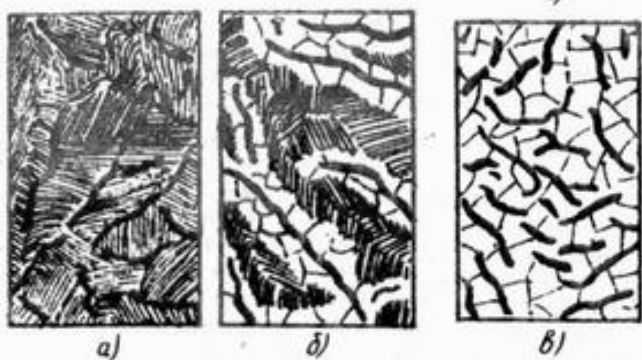


Рисунок 13. Вид излома серого чугуна.

В зависимости от распада цементита различают ферритный, ферритно – перлитный и перлитный серые чугуны (Рис. 2). Наиболее прочным, но в то же время наименее пластичным, является чугун на перлитной основе. Чугун на



ферритной основе обладает наивысшей пластичностью при наименьшей прочности.

Рисунок 2. Структура серого чугуна (а – перлитная, б – ферритно-перлитная, в – ферритная).

**Высокопрочный чугун.** Высокопрочными называются чугуны, в которых графит имеет шаровидную форму (Рис. 3). Получают путем введения в жидкий серый чугун специальных добавок.

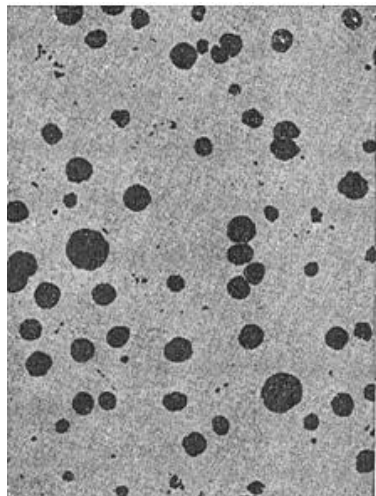


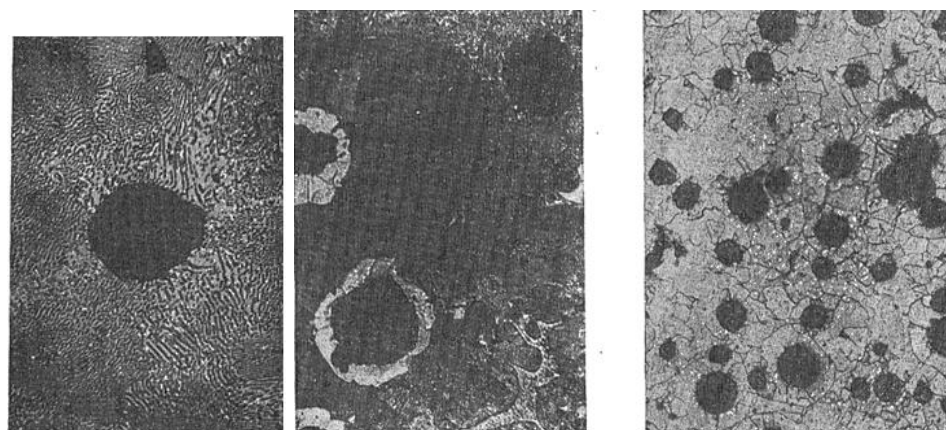
Рисунок 3. Шаровидный графит.

Высокопрочные чугуны могут иметь ферритную, феррито-перлитную и перлитную металлическую основу (Рис. 4).

Чугуны с перлитной металлической основой имеют высокие показатели прочности при меньшем значении пластичности. Соотношение пластичности и прочности ферритных чугунов - обратное.

Для данных чугунов характерна достаточно высокая ударная вязкость и усталостная прочность, при перлитной основе.

Высокопрочные чугуны содержат: углерода – 3,2...3,8 %, кремния – 1,9...2,6 %, марганца – 0,6...0,8 %, фосфора – до 0,12 %, серы – до 0,3 %.



а б в

Рисунок 4. Структура высокопрочного чугуна (а – перлитный, б – перлитно – ферритный, в - ферритный).

Из этих чугунов изготавливают многие детали, в том числе фасонные, которые ранее получали из стали (корпусы и станины станков, крупные планшайбы, гильзы, каретки, цилиндры, кронштейны, зубчатые колеса, накладные направляющие станков, детали с поверхностной закалкой и др.).

**Ковкий чугун.** Ковким называют чугун с хлопьевидным графитом. Его получают путем отжига белого чугуна определенного химического состава, отличающегося пониженным содержанием графитизирующих элементов (2,4—2,9 % С и 1,0—1,6 % Si), так как в литом состоянии необходимо получить полностью отбеленный чугун по всему сечению отливки, что обеспечивает формирование хлопьевидного графита в процессе отжига.

Промышленный ковкий чугун производится главным образом с ферритной основой; в ней однако всегда имеется перлитная кайма. В последние годы стали широко применяться чугуны с феррито-перлитной и перлитной основой. Чугун с ферритной основой обладает большой пластичностью.

Излом у ферритного ковкого чугуна черно-бархатистый; с увеличением количества перлита в структуре излом становится значительно светлее.

Данный чугун получил свое название из-за повышенной пластичности и вязкости (хотя обработке давлением не подвергается). Ковкий чугун обладает повышенной прочностью при растяжении и высоким сопротивлением удару. Из ковкого чугуна изготавливают детали сложной формы: картеры заднего моста автомобилей, тормозные колодки, тройники, угольники и т. д.

**Маркировка.** Ковкий чугун обозначается двумя буквами и двумя числами (ГОСТ 1215-85), например КЧ 370-12. Буквы КЧ означают ковкий чугун, первое число—предел прочности (в МПа) на разрыв  $\sigma_B=370$  МПа, второе число — относительное удлинение (в процентах), характеризующее пластичность чугуна  $\delta=12\%$ .

Легированные чугуны получают при введении в их состав легирующих компонентов (Cr, Si, Al, Ni, Mn и др.) Легирование производится для получения каких либо особых свойств: износостойкости, жаростойкости, коррозионной стойкости и др. Из легированных чугунов можно выделить следующие группы:

- износостойкие чугуны;
- жаростойкие чугуны;
- жаропрочные чугуны;
- коррозионностойкие чугуны;
- антифрикционные чугуны.

Легированные чугуны маркируются по типу: первые буквы означают вид чугуна: Ж-жаростойкий, А-антифрикционный, Ч-жаропрочный или коррозионностойкий. Следующие буквы обозначают наличие легирующих элементов (Х-хром, С-кремний, Ю-алюминий, Д-медь, Н-никель, Г-марганец, М-молибден, В-вольфрам). Цифры после букв указывают примерное содержание легирующего элемента в процентах. Если цифры нет, то

содержание легирующего элемента соответствует ~1 %. Например, ЖЧЮ7Х2- жаростойкий чугун, алюминия –7 %, хрома –2 %.

**Износостойкие чугуны.** Износостойкость чугуна повышается при увеличении в структуре количества карбидов как простых (цементита), так и специальных (карбидов хрома, вольфрама, ванадия и т.д.). Металлическая матрица должна прочно удерживать твердую составляющую (карбиды) и предотвращать ее хрупкое разрушение. Характерным представителем износостойких чугунов является высокохромистый износостойкий чугун ИЧХ20М2ГЗН2. Средний химический состав высокохромистого чугуна: С = 2,6-3 %, Si = 0,3-1,4%, Mn = 0,5-5,5% Cr = 12-30%, Mo=0,4-4%, Ni = 0-3%, S≤0,08% , P≤0,1%. Существуют и другие виды износостойких чугунов (белый низколегированный, ОИ-1, ИЧХ4Г7Д, нихард и т.д.), но они уступают высокохромистому по износостойкости и поэтому применяются реже.

**Жаростойкие чугуны.** Жаростойкие чугуны используются для изготовления деталей, работающих в газовой, воздушной, щелочной средах при температурах 500-1100°С. Жаростойкостью чугуна по ГОСТ 7769-85 называется способность сопротивляться росту и окалинообразованию при заданной температуре. Сопротивление окислению чугуна обусловлено наличием на поверхности плотных защитных окисных пленок (окислы Al, Si, Cr) , которые предохраняют металл от последующего окисления при высоких температурах. Жаростойкие чугуны бывают хромистые, кремнистые и алюминиевые. Средний химический состав жаростойких чугунов: С=2,0-3,9%, Si=1,5-6,0%, Mn=0,4-1,0%, Cr=0,5-32%, Al=19-25%. Структура хромистого чугуна состоит из ферроидизированного перлита, отдельных включений карбидов и графита. В высокохромистом сплаве (26-30% Cr ) структура состоит из твердого раствора хрома в α-железе и карбидов в виде карбидной эвтектики ( при С>2% ) . При содержании Cr от 3-10% отливки получают с высокой хрупкостью и твердостью, делающей невозможной обработку резанием. Поэтому такие чугуны находят ограниченное применение. Кремнистые чугуны отличаются хорошей обрабатываемостью резанием, так как получается ферритная структура металлической матрицы. Алюминиевые чугуны даже с содержанием алюминия 8% имеют такое же сопротивление окислению, как нихром- сплав с 80% Ni и 20% Cr и жаростойкостью 800°С. При легировании алюминиевого чугуна хромом (~30%)и кремнием (~6%) жаростойкость возрастает до 1200° С при одновременном повышении прочности и сохранении литейных свойств.

**Жаропрочные чугуны.** Жаропрочные чугуны применяются для изготовления деталей, работающих под нагрузкой при повышенных температурах (до 600°С). Марки жаропрочных чугунов обозначаются буквой «Ч», остальные обозначения такие же, как у всех остальных. Буква «Ш» в

конце обозначения означает «с шаровидным графитом». Наиболее высоким уровнем жаропрочных свойств обладает аустенитный чугун с шаровидной формой графита. Отличительной особенностью структуры аустенитного чугуна, легированного хромом и магнием, является наличие в структуре карбидной составляющей, количество которой составляет 50%. Мелкодисперсные структуры показывают более высокую жаропрочность, поэтому жаропрочные чугуны подвергаются специальной термообработке - гомогенизирующему отжигу. (1050° С- 4 часа) Аустенитный жаропрочный чугун имеет следующий состав: C=2,5-3,0%, Si=1,8-2,5%, Mn=1,0-8,0%, Cr=1,0-3,5% ,Ni=10-20%, S≤0,05%, P≤0,03%.

**Коррозионностойкие чугуны.** Коррозионностойкие чугуны применяются для изготовления деталей с высокой коррозионной стойкостью в различных рабочих средах (морской воде, растворах кислот, расплавах солей, в перегретом водяном паре, в сернистых газах и т. д.). Для повышения коррозионной стойкости чугун легируется в основном Cr , Ni, Cu и другими элементами, которые создают на поверхности чугуна защитные (пассивирующие) пленки, а так же легируют металлическую матрицу (преимущественно, феррит) образуя химические соединения с высоким химическим потенциалом. Происходящее при этом измельчение структуры понижает число микропор и уменьшает разность потенциалов между отдельными структурными составляющими. Коррозионностойкие чугуны делятся на следующие группы: - низколегированные чугуны (Cr до 1%, Ni до 1%); -высококремнистые чугуны (ферросилиды); -кремнемолибденовые чугуны (антихлоры); -аустенитные никелевые чугуны (нирезист); - высокохромистые чугуны. Каждая группа чугунов применяется в особых, специфических условиях, для которых и была специально разработана. Коррозионностойкие чугуны широко применяются в химическом машиностроении, на железнодорожном транспорте для перевозки продуктов химической промышленности , в металлургическом машиностроении и др.

**Антифрикционные чугуны.** Антифрикционные чугуны (ГОСТ 1585-85) применяются для изготовления подшипников скольжения, работающих в присутствии смазки. Из антифрикционного чугуна изготавливаются цилиндры, поршни, станины, зубчатые колеса, втулки, вкладыши подшипников и т.д. Наиболее важными свойствами антифрикционного чугуна являются высокая износостойкость, хорошие литейные свойства и низкая стоимость. Главный недостаток антифрикционного чугуна – пониженная по сравнению с бронзой прирабатываемость. Средний химический состав антифрикционного чугуна: C=2,5-3,8 %, Si=0,8-2,7 %, Mn=0,3-1,2 %, P<0,15 %, S<0,03 %, Cr=0,2-0,4 %, Ni=0,2-0,4 %, Ti=0,1 %, Cu=0,3-0,7 %. (ГОСТ 1585-85). Антифрикционные чугуны легируются хромом, никелем, титаном и

медью, что позволяет получить мелкодисперсную структуру перлит+феррит. Маркируется антифрикционный чугун буквами АСЧ, АВЧ, АКЧ, что означает антифрикционный серый, антифрикционный высокопрочный или антифрикционный ковкий. Последний (АКЧ) применяется с термообработкой, остальные без термообработки. Для нормальной работы деталей из антифрикционного чугуна ГОСТ 1585-85 устанавливает режим работы в узлах трения.

**Свариваемость чугунов.** Трудности сварки серых чугунов обусловлены высоким содержанием углерода в составе основного металла, склонностью к образованию цементита и ледебурита при кристаллизации и в случае ускоренного охлаждения малой пластичностью основного металла и ЗТВ, относительно низким значением температуры кристаллизации металла сварочной ванны на железной или железоникелевой основе, высокой газонасыщенностью, а также наличием в чугуне микропустот и рыхлот, в которых концентрируются газы. Дополнительные трудности могут возникнуть при сварке деталей с измененной структурой и свойствами, которые сформировались под воздействием условий эксплуатации изделия («горелый» или пропитанный маслом чугун).

При сварке чугуна низкоуглеродистыми электродными материалами на основе железа наблюдается глубокое проплавление основного металла, который, поступая в металл сварочной ванны, насыщает ее углеродом. При этом в стальных швах формируются метастабильные структуры, выделяется цементит по границам зерен и образуется мартенсит (структура закаленной доэвтектоидной стали). При этом повышается твердость, снижается пластичность металла шва, возрастает склонность сварных соединений к образованию трещин. Наиболее четко эта тенденция наблюдается при сварке деталей без подогрева.

Учитывая, что чугун имеет низкую пластичность во всем диапазоне температур термического цикла сварки, он не выдерживает значительных сварочных напряжений в околошовной зоне. Разрушению соединений в процессе сварки способствует также образование неравновесных фаз (цементита, ледебурита и мартенсита) в металле ЗТВ.

Вредные примеси (фосфор и сера) ухудшают свариваемость чугуна. Так, содержание в чугуне более 0,06-0,07 % серы вызывает образование пор в швах и повышение твердости соединения, так как способствует формированию структур с ледебуритом.

Существенное влияние на свариваемость чугуна оказывает графитная фаза. Если включения графита крупные и образуют сетку, то в зоне сплавления

возникает большое количество микропустот, которые снижают прочность сварного соединения.

Существенно ухудшается свариваемость деталей из чугуна, которые эксплуатировались в условиях воздействия высоких температур, частых теплосмен и в агрессивных средах. Металлическая матрица таких чугунов сильно окислена и зачастую их сварка практически невозможна.

Пропитка чугуна маслами и продуктами их сгорания также усложняет сварку, особенно в случае требования герметичности шва. Плохо свариваются чугуны, поверхность которых контактировала с продуктами сгорания топлива — выхлопными газами.

Все перечисленные выше случаи требуют дополнительных мер, направленных на подготовку деталей под сварку (удаление «горелого» слоя, выжигание масла со свариваемых поверхностей, кипячение в щелочных ваннах и т. д.).

Существенные трудности возникают при сварке специальных чугунов, прежде всего КЧ и ЧШГ. В этих случаях трудно получить соединения, равнопрочные и идентичные по свойствам основному металлу. Склонность сварных соединений к образованию у ЧШГ трещин в ЗТВ значительно выше, чем у обычных серых чугунов при одинаковом содержании углерода, кремния и марганца. Сварку таких изделий осуществляют только при предварительном высокотемпературном подогреве всей металлоконструкции.

Поскольку у чугунов меньшая усадка, чем у сталей (примерно в 2 раза), это позволяет заваривать крупные дефекты литья без образования трещин. Для предотвращения образования структур отбела в металле шва и ЗТВ необходим предварительный подогрев до температуры 600-700°С с последующим охлаждением изделия со скоростью 50-100 °С/ч.

Для сварки чугуна без предварительного подогрева «холодной сварки» используют сварочные материалы на железной основе. Стальной шов легируют сильными карбидобразующими элементами (ванадием, ниобием, титаном), которые связывают углерод в мелкие карбиды, распределяющиеся в низкоуглеродистой металлической матрице. Этот способ реализуется при использовании покрытых электродов марки ЦЧ-4, содержащих в своем составе до 10 % ванадия.

Для холодной сварки чугуна применяют также электродные материалы из цветных металлов (меди и никеля) и их сплавов. При этом в металле шва не образуются стойкие карбиды и он остается пластичным после наплавки на чугун.



Железоникелевые сплавы с массовой долей никеля более 30 % являются аустенитными при нормальной температуре. Никелевый аустенит, растворяющий большое количество углерода без образования карбидов, имеет высокую пластичность и низкую твердость. Эти особенности никелевого аустенита обеспечивают высокую стойкость сварных соединений чугунов против образования трещин и их хорошую обрабатываемость.

Медь так же, как и никель, не образует карбидов, но в отличие от него практически не растворяет углерод и железо. Имея высокую пластичность и указанное выше отношение к углероду и железу, медь используют в качестве электродного или присадочного материала при сварке чугуна.

Металл ЗТВ при сварке чугунов имеет разнообразные структуры. Это связано с тем, что температура в ЗТВ под воздействием сварочного цикла колеблется в широком диапазоне, а химические и физические характеристики чугунов характеризуются большой неоднородностью. В процессе нагрева до температуры 1150-1250 °С чугун в ЗТВ находится в жидкотвердом состоянии. Охлаждение происходит при высоких скоростях 10-20 °С/с и выше, при которых в металле ЗТВ формируются продукты неполного распада аустенита, мартенсит и троостит, а жидкая фаза кристаллизуется с образованием ледебурита. На конечную структуру этого участка состав электродного металла практически не влияет, поэтому при сварке без подогрева в этой зоне наблюдаются повышение прочности и твердости, а также снижение пластичности свариваемого чугуна. Стойкость сварных соединений против образования трещин во многом зависит от размеров ЗТВ — чем она уже, тем меньше вероятность образования трещин.