

369

ПОСТАВЛЯЮ

СЕРЫЙ ЧУГУН

СБОРНИК
АМЕРИКАНСКОГО ОБЩЕСТВА ЛИТЕЙЩИКОВ (AFA)
И АМЕРИКАНСКОГО ОБЩЕСТВА
ПО ИСПЫТАНИЮ МАТЕРИАЛОВ (ASTM)

ПОСТАВЛЯЮ

О П Т И 1935

СЕРЫЙ ЧУГУН

СБОРНИК

АМЕРИКАНСКОГО ОБЩЕСТВА ЛИТЕЙЩИКОВ (АФА)

И АМЕРИКАНСКОГО ОБЩЕСТВА

ПО ИСПЫТАНИЮ МАТЕРИАЛОВ (ASTM)

Перевод инж. Н. П. ТАРХОВА

Под редакцией доцента В. А. АРОНОВИЧА

2005

ПОДАЦИ



РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

ОНТИ НКТП СССР

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Москва 1935 Ленинград

БИБЛИОТЕКА
Академии Наук СССР

1/302867

SYMPOSIUM ON COST IRON
PUBLISHED BY THE
ASTM and the AFA
1 9 3 3

Объединенным комитетом авторитетных американских научных организаций (О-во литейщиков и О-во испытания материалов) за последние годы изданы симпозиумы (сборники статей) по серому и ковкому чугунам и стали. Настоящая книга представляет собой прорецензированный перевод сборника статей по серому чугуну.

На основе современных теоретических и практических данных в сжатой, конкретной форме подробно освещена природа, технические свойства и применение литейных обыкновенных машиностроительных и специальных чугунов. По характеру изложения и по насыщенности фактическим материалом книгу можно отнести к разряду справочников. Резко выраженный металлургический уклон отличает книгу. Читатель — инженер-производственник, научный работник, студент.

ОТ РЕДАКТОРА

Обзор, составленный Объединенным комитетом авторитетных американских научных организаций (Американское о-во литейщиков и Американское о-во испытания материалов), охватывает и подробно освещает природу, технические свойства и применение литейных машиностроительных чугунов, включая серые, высококачественные особой прочности, легированные, подвергнутые закалке, аустенитовые и другие термически обработанные сорта. Ясное, понятное, хорошо иллюстрированное изложение на основе современных теоретических и практических данных позволило в удобной сжатой форме охватить с практически возможной полнотой рассматриваемый важный предмет. Разбор и объяснения зависимости технических применений чугунов от их физико-механических свойств представляют особую практическую ценность. Обзор дает достаточно ясное освещение таких важнейших вопросов, как влияние состава и скорости охлаждения на структуру и свойства, а также природы и значения роста, изнашиваемости, обрабатываемости, коррозии, свариваемости и заглушающей (вибрацию) способности для разных видов чугунов.

Сборник представляет, бесспорно, большой интерес не только для инженерно-технических работников по литейной специальности, но в неменьшей степени для техников других специальностей (по холодной обработке резанием и др.) и для заводского технического персонала вообще. Сборник сможет служить прекрасным учебным пособием для специальных вузов, а также для повышения квалификации вообще. Для конструкторов сборник также является ценным руководством для обоснования выбора сортов чугуна, наряду со специальной главой, посвященной основным моментам конструирования, непосредственно связанным с процессом получения чугунной детали; однако вследствие резко выраженного металловедческого характера книги — эта глава дана в очень кратком виде. Наконец, конкретность, ясный и сжатый характер изложения и насыщенность богатым цифровым и табличным материалом дают полную возможность пользоваться сборником в качестве хорошего справочника. Приведенная в конце справочника библиография научных трудов, использованных Комитетом при составлении обзора, с соответствующими сносками в тексте позволяет читателю легко ориентироваться в специальной иностранной литературе и по желанию

расширить освещение того или иного вопроса; поэтому в настоящем переводе библиография не подвергалась специальному расширению с целью сохранения комплекса источников, нашедших отражение в тексте.

В заключение следует отметить, что обзор, вследствие сложности рассматриваемого предмета и неопределенности еще в настоящее время ряда моментов, не может претендовать на исчерпывающую полноту. Однако основную задачу составителей по включению в сборник только наиболее проверенных точных современных данных и сведений можно считать выполненной добросовестно и успешно, что делает сборник практически особенно ценным.

Ценность и удобство пользования этой книгой делает желательным выпуск подобных сборников и по другим важнейшим видам литейных сплавов.

Доц. В. Аронович

I. ВВЕДЕНИЕ

Чугун — первый из черных сплавов, примененных для литья в течение почти двух столетий, — играет первенствующую роль в промышленности. Однако лишь только в самом конце девятнадцатого века чугунолитейное производство, став на научную базу, перестало быть искусством. Основным стимулом к переводу производства на научные основы послужила конкуренция других качественных металлов, сравнительно недавно введенных в практику и заставивших начать борьбу за улучшение рабочих свойств чугуна, организацию точного технического контроля и разработку наиболее экономичных способов производства.

В настоящее время литейный чугун продолжает оставаться ценным машиностроительным материалом, с широкими перспективами дальнейшего улучшения его свойств в самом ближайшем будущем.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Удовлетворительное определение термина «литейный чугун» до настоящего времени не предложено. В представлении специалиста термин этот обозначает вообще твердый, хрупкий металл. Однако этот термин общего характера на практике относится в настоящее время к целой серии железоуглеродистокремниевых сплавов, содержащих от 2 до 4% С и от 0,25% и более кремния в сочетании с различными количествами марганца, серы и фосфора, иногда с одним или более специальным легирующим элементом вроде никеля, хрома, молибдена, ванадия и титана.

Литейный чугун, вообще говоря, можно определить, как железо, содержащее углерод или другой элемент в таком количестве, которое лишает железо ковкости. Литейные чугуны могут быть подразделены на три класса: 1) серый чугун, 2) белый чугун и 3) закаленный чугун.

Серые литейные чугуны представляют собой чугуны, в которых большая часть углерода, распределена по всей массе отливки в виде графита (включений свободного углерода).

Белые чугуны представляют собой чугуны с изломом белого цвета, вследствие того, что почти весь углерод, входящий в их состав, находится в химически связанной форме — в виде карбида железа (Fe_3C). Такой чугун чрезвычайно тверд и хрупок. В большинстве случаев белый чугун изготавливается в литейных ковкого чугуна, где из него после надлежащей термической об-

работки получается ковкий чугун. Некоторые отливки из белого чугуна непосредственно поступают в работу (как например лемехи для плугов, диски и шары для дробильных мельниц) в тех случаях, когда главное внимание обращается на твердость и сопротивление истиранию.

Закаленным чугуном называется такой, который в некоторых своих частях при помощи кокилей охлаждается с поверхности настолько быстро, что весь содержащийся в нем углерод находится в этих частях в химически связанном состоянии, как в белом чугуне; прочие части этих отливок охлаждаются нормально и имеют строение серого чугуна. В зонах, переходных от белого закаленного чугуна к серому, образуется так называемый «половинчатый» чугун, средний по строению между белым и серым чугуном. Примером такого рода чугунных отливок могут служить закаленные валки.

Термин «полусталь» (сталистый чугун) первоначально служил для обозначения литейного чугуна, выплавлявшегося в вагранке на шихте с присадкой стального скрапа. Применение этого термина нецелесообразно, так как получаемый сплав свойствами стали не обладает и, по существу, является чугуном. Даже когда вся ваграночная шихта состоит из стали, как это иногда практикуется, то вследствие процесса науглероживания во время плавки из вагранки получается чугун, а не сталь.

ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Хотя чугун был первым черным сплавом, использованным для литья, однако никаких достоверных сведений о том, когда именно это произошло, не имеется. Хотя изготовление разных изделий из чугуна известно до начала нашего летоисчисления, но начало промышленного применения чугуна было положено производством чугунных пушечных ядер в конце XIV века. Известно лишь, что на первых порах и в течение долгого времени чугунолитейная мастерская составляла часть доменного завода, так как отливки изготовлялись непосредственно из чугуна доменной печи (первой плавки).

Введение вагранки приписывают французу Реомюру, впервые применившему около 1750 г. способ переплавки доменного чугуна и скрапа. Удобство и дешевизна этого способа способствовали быстрому распространению вагранки во всей Европе.

По мере развития машиностроения чугунолитейное производство начинает приобретать большое значение в деле обеспечения промышленности нужными металлическими деталями.

Однако в течение долгих лет это производство оставалось на уровне, скорее искусства, чем науки, и лишь в конце девятнадцатого столетия положение резко меняется в связи с введением химического анализа для контроля качества чугуна и распространением формовочных машин.

Решающим моментом в вопросе перевода чугунолитейного производства на научную основу послужили все возраставшие

требования к качеству отливок, прежде всего со стороны сельскохозяйственного машиностроения, а затем автостроения.

Введение в практику легированных чугунов и усовершенствования, достигнутые в области термической обработки и плавки, в очень большой степени расширили возможность придания чугуна нужных свойств и улучшения его качества. Примерно еще десять лет назад чугуны с временным сопротивлением разрыву в 28 кг/мм^2 считались большой редкостью. В настоящее же время чугуны с временным сопротивлением в $31,5\text{—}38,5 \text{ кг/мм}^2$ изготавливаются в промышленном масштабе. На многих заводах получают из вагранки чугуны с временным сопротивлением разрыву 49 кг/мм^2 , а из пламенных и электрических печей даже еще более прочные. Такие чугуны, обладающие к тому же твердостью около 300 по Бринелю, в состоянии заменить кованую сталь в таких деталях, для которых чугуны совсем еще недавно считались совершенно неподходящим.

ПРОИЗВОДСТВО ОТЛИВОК

Производство чугунных отливок складывается из следующих главнейших моментов: 1) конструирования, 2) изготовления моделей и стержневого инвентаря, 3) формовки, 4) изготовления стержней, 5) расплавления чугуна и разливки в формы и 6) очистки отливок и контроля.

Конструирование

При конструировании отливок необходимо принимать во внимание усадку металла, толщину стенок отливок; расположение литников, уклоны на боковых стенках для выема модели, способы укрепления стержней и легкость вывода газов из формы, удобство обрубки и очистки отливки, а также экономичность изготовления. Существенное влияние на качество литья оказывает также качество моделей и стержневых ящиков.

Формовка

Чаще всего литье производится в песчаных сырых и сухих формах. Для крупных отливок часто применяется формовка в глине. Наконец, употребляются еще шамотовые полупостоянные и металлические постоянные формы. Большая часть чугунных отливок изготавливается в сырых формах, лишь для очень крупного и ответственного литья применяются предварительно высушенные формы. Постоянные формы из металла (иногда с огнеупорной облицовкой) получили в последнее время широкое распространение даже для отливок сложной конфигурации, но выгодны они лишь в условиях массового производства. Центробежное литье, как одна из разновидностей литья в постоянные метал-

лические формы (иногда с песчаной огнеупорной набойкой), применяется лишь в особых случаях, главным образом в производстве чугунных труб, а в последнее время частично и для фасонных отливок.

Наготовление стержней

Стержни обыкновенно готовятся из специальных песчаных стержневых смесей в стержневых ящиках. Обычно употребляются сухие стержни, только в редких случаях, сырые. В металлических формах часто применяются металлические стержни.

Плавка чугуна и разливка в формы

Старейшей и наиболее экономичной плавильной печью является вагранка, дающая возможность легко получать чугун в любом требуемом количестве, хотя в отношении регулирования качества и требуемого перегрева жидкого чугуна вагранка уступает другим типам печей. Для плавки некоторых видов высококачественных чугунов более подходит пламенная печь (отражательная), хотя она менее экономична и исключает возможность непрерывной выплавки, если не применяется дуплекс-процесс. Для особо качественного литья в последнее время широко применяют электрические печи, дающие более высокую температуру перегрева чугуна, возможность применения более дешевых шихтовых материалов и удобство контроля за качеством.

Однако эксплуатационная стоимость электроплавки выше по сравнению с ваграночной плавкой. С целью использовать преимущества сочетания электропечи с вагранкой в последнее время часто ведут плавку чугуна так называемым дуплекс-процессом, когда расплавление чугуна происходит в вагранке, а рафинирование и перегрев расплавленного металла — в электрической печи, т. е. электропечь работает только на жидкой завалке. В связи с усовершенствованием способов сжигания пылевидного горючего, в Германии недавно была с успехом применена для плавки чугуна вращающаяся печь на пылевидном угольном топливе (печь Бракельсберга). Сравнительно большая экономичность и возможность строгого контроля состава чугуна способствовали распространению этой печи в Европе, а частично в Америке.

Выпущенный из печи чугун разливается ковшами по формам.

Выбивка и очистка

После застывания и охлаждения отливки выбиваются из формы. Затем, после удаления литников, отливки поступают на очистку от приставшего песка щетками или во вращающихся барабанах, или наконец, пескоструйными или водоструйными аппаратами (гидравлическая чистка). Иногда отливки очищаются химическим способом путем травления в кислотах. После очистки отливки подвергаются окончательному контролю.

В некоторых случаях после очистки отливки подвергаются термической обработке.

Нет такой области, где отливки из чугуна не нашли бы применения благодаря своей дешевизне, прочности, хорошей поверхности и четкости очертаний. Введение в практику легированных чугунов и специальных шихт, дающих возможность получать металл повышенного качества, еще более расширило и продолжает расширять области применения чугунного литья.

II. МЕТАЛЛУРГИЯ ЛИТЕЙНОГО ЧУГУНА

Термин «литейный чугун» применяется к ряду сплавов железа, углерода и кремния, содержащих одновременно заметные количества других элементов, а именно: марганца, фосфора и серы. В целях улучшения тех или иных свойств часто добавляют в чугун так называемые легирующие элементы, например никель, хром, молибден, медь, титан и т. д.

Большая часть рыночных сортов чугуна содержит от 2,5 до 3,75% С и от 0,25 до 3,00% Si. В белых, закаленных чугунах, кремния содержится обычно менее 1%. Очень массивные отливки иногда отливаются из чугуна с содержанием кремния менее 1%; в большинстве отливок из серого чугуна содержание кремния колеблется в пределах от 1 до 2,75%.

НОРМАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЧУГУНА

Формы углерода

Углерод в литейных чугунах может находиться в трех или более формах. В совершенно белых чугунах и в отбеленных частях отливок большая часть углерода находится в виде структурно свободного карбида или так называемого цементита. Цементит представляет собой карбид железа, состав которого выражается формулой Fe_3C . Цементит очень тверд и довольно хрупок. Эти свойства цементита в значительной мере сообщаются и тем чугунам, в которых цементит является основной структурной составляющей. В очень мягких серых чугунах большая часть углерода находится в свободном состоянии в виде мягких и слабых графитных включений в основной металлической массе. Последняя состоит в большинстве рыночных сортов серого чугуна из перлита, феррита (структурно чистого железа) и карбида эвтектоида железа. Перлит, как структурная составляющая, обладает значительной твердостью, высоким сопротивлением износу и другими достоинствами.

Факторы, влияющие на свойства чугуна

Свойства литейного чугуна определяются количеством, величиной и распределением различных форм углерода, содержащихся в данном чугуне.

Требуемые свойства сообщаются чугуну путем регулирования его химического состава (главным образом содержания углерода

и кремния) и других факторов. К их числу относятся:

1. Химический состав, исходный и окончательный.
2. Структура и состав шихты.
3. Плавильный процесс.
4. Термические и физические процессы с момента выпуска из печи до окончательного охлаждения отливки.
5. Последующая термическая обработка отливки.
6. Конструкция отливки и качество работы.

При прочих равных условиях свойства металла зависят от его химического состава. Все факторы, за исключением состава, находятся под полным контролем самой литейной и в большинстве случаев могут считаться неизменными. Поэтому, когда завод сам изготавливает для себя литье, совершенно естественно включить в рабочие спецификации и химический состав. Если же литье приобретается на стороне, то состав исходных материалов, понятно, большого практического значения иметь не может.

В различных литейных, работающих на различных исходных материалах и различными способами, могут получаться чугуны почти с одинаковыми механическими свойствами. В таких случаях чрезмерно строгие требования в отношении химического состава зачастую могут создавать практически неоправдываемые сгращения и затруднения. Поэтому в спецификациях Американского общества испытаний материалов¹ химический состав не стандартизуется.

При наличии определенного надежного поставщика литья, спецификация химического состава может оказаться полезной в качестве дополнительного способа контроля продукции.

Основной интерес для потребителя представляют механические свойства чугуна, и если таковые оказываются удовлетворительными, то способы достижения этих свойств уже не так существенны.

Влияние углерода

Механические свойства любой чугунной отливки определяют ее структурой и отсутствием в ней дефектов. Структура чугуна в значительной степени зависит от количества, размера и распределения в металлической массе различных форм углерода. Более подробно вопрос о зависимости между структурой чугуна и его механическими свойствами рассматривается ниже, в разделе «Структурные составляющие».

Общее содержание углерода в данном чугуне зависит от его содержания в шихте и от изменений его количества во время плавки. В доменной печи расплавленное железо легко поглощает и растворяет углерод из кокса и в большинстве случаев к моменту выпуска насыщается углеродом. Количество растворенного углерода зависит, главным образом, от температуры процесса и от содержания в чугуне кремния и фосфора.

¹ ASTM, Specifications A 48 32 T, "Proceedings, ASTM" Vol. 32, Part 1, 1932, стр. 625, также см. 1932, Book of ASTM, Tentative Standards, стр. 179.

С повышением температуры растворимость углерода в железе также возрастает [1]¹. Количество углерода, растворяющегося в чистом железе при температуре его застывания, обычно соответствует эвтектическому содержанию, равному 4,3%. Каждый процент кремния уменьшает содержание углерода в эвтектике примерно на 0,30%. В силу этого в кремнистых доменных чугунах общее содержание углерода обычно меньше. Фосфор точно так же способствует уменьшению содержания углерода в пропорции 0,30% на каждый процент фосфора.

Покупной лом и оборотный скрап нормально содержат углерода меньше, чем штыковой чугун. Само собой разумеется, количество углерода в оборотном скрапе должно быть известно или определено. В обыкновенном рыночном чугунном ломе общее содержание углерода может колебаться в пределах от 3,00 до 3,75%. Стальной скрап содержит от 0,10 до 1,00% С, причем нижний предел соответствует мягким сортам стали, а верхний — твердым.

Во время переплавки чугуна и лома в вагранке или в иной печи содержание углерода меняется, и в конечном счете, устанавливается определенное равновесие. Окислительные газы стремятся уменьшить количество углерода в переплавляемом металле, тогда как восстановительные газы и раскаленный кокс могут, наоборот, способствовать науглероживанию металла. Комбинирование различных условий плавки, с целью обеспечения нужного содержания углерода в чугуне, требует известного опыта и непрерывного контроля плавки.

В отношении механических свойств малоуглеродистый чугун (2,75—3,25% С) следует предпочитать высокоуглеродистому (3,25—3,75% С), вследствие того что первый обладает большей прочностью и однородностью свойств. Малоуглеродистый чугун обычно менее жидкотекуч (при одной и той же температуре заливки) и требует более внимательного контроля за плавкой и формовкой в целях предотвращения дефектов, вызываемых усадкой. Тем не менее из малоуглеродистого чугуна можно получать вполне здоровые отливки без всяких внутренних пороков. В связи с повышенной прочностью и твердостью малоуглеродистый чугун обыкновенно обрабатывается несколько хуже. Однако современные малоуглеродистые чугуны с повышенным содержанием кремния обрабатываются легче обычных высокоуглеродистых чугунов с малым содержанием кремния при одной и той же прочности в обоих случаях.

Влияние кремния

Кремний способствует распаду карбида железа и является тем элементом, от которого зависит соотношение между связанным углеродом и графитом. При прочих равных условиях, чем выше содержание кремния, тем больше количество графита в чугуне, и тем, следовательно, меньше содержание связанного

¹ Цифры в скобках—ссылки на библиографию, помещенную в конце книги.

углерода. Это дает возможность литейщику в его производственных условиях влиять на свойства получаемых отливок при данном содержании общего углерода путем регулирования количества кремния. Таким образом, если нужно получить мягкий чугун невысокой прочности, необходимо повысить содержание кремния в чугуне, и наоборот. Если в целях получения чугуна с наибольшей прочностью содержание кремния будет снижено за пределы допустимого, в отливках появятся твердые закаленные места, и обрабатываемость вследствие этого ухудшится. Сказанное относится к чугунам, с содержанием кремния ниже 3%.

Как уже упоминалось выше, увеличение количества кремния влечет за собой уменьшение растворимости углерода в железе.

Согласно новейшим данным, кремний растворяется в железе с образованием хрупкой и довольно твердой основной массы. Наличие растворенного кремния в основной массе способствует увеличению прочности и твердости этой массы.

Однако, если содержание кремния превышает 3%, то он полностью вытесняет карбид железа, и получается материал, состоящий из графита, распределенного в основной массе с таким большим содержанием растворенного кремния, что чугун делается твердым, хрупким и менее прочным. Так например, при содержании около 4% Si излом чугуна становится стекловидным, содержание углерода падает примерно до 3,08%, и такой чугун почти непригоден для машиностроения: его можно применять только в качестве жароупорного материала.

Сравнительно недавно влияние общего углерода на свойства чугуна большинством литейщиков в должной мере не оценивалось, и поэтому содержание его не контролировалось. Расчет шихты в большинстве случаев вели по кремнию. В настоящее же время, благодаря более глубокому знакомству с действием углерода и других факторов, пределы содержания кремния могут сильно отличаться от ранее предписанных. Так например, в большинстве современных высококачественных чугунов содержание общего углерода невелико, и поэтому кремния в них должно быть гораздо больше, чем в высокоуглеродистых чугунах.

Кремний оказывает следующее влияние на свойства чугуна:

1. Уменьшает стабильность карбида железа (цементита) и тем самым способствует графитизации чугуна.

2. Уменьшает содержание углерода в эвтектике. В связи с этим растворимость углерода при данных температурных условиях, а также распределение структурных составляющих в значительной мере меняются.

3. Раскисляющее действие кремния, по всей вероятности, отражается косвенно на графитизации чугуна и также может влиять на жидкотекучесть последнего.

4. Смещает точки эвтектического и эвтектоидного превращения, хотя в некоторых случаях наличие других элементов, главным образом марганца, может маскировать этот эффект.

5. Уменьшает содержание углерода в эвтектоиде (перлите).
6. При избытке дает мало прочную, хрупкую основную массу и практически полную графитизацию.

Влияние марганца

Содержание марганца в большинстве рыночных сортов чугуна колеблется от 0,4 до 1,00%. Вообще говоря, если кремния достаточно, то колебания в содержании марганца в указанных пределах, повидимому, на свойствах чугуна заметно не отражаются. Чугуны с содержанием марганца свыше 1% представляют для литейщика большой интерес. Для большинства американских чугунов вопрос о влиянии повышенного содержания марганца (например от 1,00 до 2,5%) еще недостаточно изучен.

Марганец в чугуне прежде всего вступает в соединение с серой, образуя сернистый марганец, вообще говоря, плохо растворяющийся как в жидком, так и в твердом чугуне. Сернистый марганец вместе с некоторыми другими соединениями, как например с силикатами марганца и др., обнаруживается в чугуне в виде сизых или голубовато-серых включений, удельно более легких по сравнению с расплавленным металлом. Поэтому эти включения стремятся всплыть на поверхность металла, чем объясняется, с одной стороны, возможность частичного обессеривания чугуна при выстаивании его в ковше, и с другой — обычно более высокое содержание серы и марганца в тех частях крупных отливок, которые во время заливки были обращены кверху. Для полного связывания всей серы, содержащейся в чугуне, содержание марганца должно быть на несколько десятых долей процента больше против теоретически необходимого (по стехиометрическому расчету). Таким образом марганец в сильной степени противостоит вредному влиянию, оказываемому серой.

В том случае когда содержание марганца примерно равно количеству кремния, в чугуне можно обнаружить довольно большое количество включений другого рода, по всей вероятности силиката марганца, обуславливающего своим присутствием образование стекловидных мест (glazed spots) и пористых участков в отливке. Весь остальной марганец, сверх содержащегося в вышеуказанных включениях, принято считать за карбид Mn_3C в чугунах, содержащих углерод в связанном виде. В ферритовых чугунах марганец встречается в форме твердого раствора в феррите.

Сам по себе марганец является стабилизатором карбида, хотя в чугунах с нормальным содержанием марганца указанное действие его незаметно. Увеличение содержания марганца несколько снижает положение солидуса, а также понижает температуру перлитового превращения.

Вместе с тем марганец, повидимому, несколько снижает содержание связанного углерода, необходимого для перлитовой основы. В малоуглеродистых чугунах с небольшим содержанием кремния марганец в количестве свыше 10% способствует образованию аустенитового строения. Вследствие этого вполне до-

гично будет ожидать, что по мере возрастания содержания марганца металлическая основа чугуна будет последовательно состоять из перлита, сорбита, мартенсита и, наконец, из аустенита. В перлитовом чугуне увеличение содержания марганца, например с 0,40 до 0,70%, почти никакого влияния на металлическую основу не оказывает. При содержании марганца около 1% структура основы должна иметь отчасти сорбитовый характер, как это и наблюдается, например в марганцовистой стали с соответственным содержанием марганца.

При нормальном содержании марганец служит неплохим раскислителем и очистителем чугуна, хотя относительно большое содержание углерода и кремния в чугунах само по себе уже является достаточной гарантией требуемой степени раскисления.

При возрастании содержания марганца усиливается несколько и усадка чугуна в жидком и твердом состояниях. Временное сопротивление разрыву, при прочих равных условиях, достигает своего наибольшего значения примерно при содержании 1% Mn.

Влияние серы

До самого последнего времени присутствие серы в чугуне в сколько-нибудь заметном количестве считалось опасным, и при содержании серы свыше 0,1% чугун в большинстве случаев считался непригодным. Вне всякого сомнения, действие серы переоценивалось и до некоторой степени даже преувеличивалось. Изучение влияния других элементов, особенно углерода, и возможность получения высококачественных чугунов с содержанием серы свыше 0,10% в значительной мере помогло рассеять это предубеждение. Большая часть рыночных сортов чугуна содержит марганец в количестве, достаточном для нейтрализации вредного влияния серы, при том условии, если происходящие при этом реакции успевают закончиться. Образующийся при этом сернистый марганец, хотя и не способствует улучшению чугуна, тем не менее находится в таких незначительных объемных количествах, что влияние его на физические свойства чугуна почти полностью покрывается преобладающим влиянием остальных включений, главным образом графитовых. Сера попадает в чугун при плавке его в вагранке как из шихты, так и из кокса. Пригар серы из горючего возможен также и в отражательных печах, при плавке ковкого и некоторых сортов серого чугуна. Вполне возможно некоторое повышение содержания серы и при отжиге ковкого чугуна.

При содержании серы не свыше 0,15% в большинстве отливок из серого чугуна никакого ухудшения материала не замечается.

Ухудшение условий плавки, в частности избыток дутья, вызывает нередко образование раковин и загрязнение отливок. В этом случае повышенное содержание серы ухудшает положение за счет образования летучих или газообразных окислов, которые совместно с газообразными окислами углерода вызывают в отливках раковины и поры.

Содержание серы в некоторых случаях, в частности при литье отливок специального назначения, может иметь решающее значение для их качества, а поэтому и контроль над содержанием серы в таких чугунах должен быть более строгим.

В том случае, если содержание марганца недостаточно, сера способствует в заметной степени стабилизации карбида, тормозя, таким образом, графитизацию чугуна. По мере возрастания содержания кремния это действие серы ослабевает. При прочих равных условиях, даже и в присутствии марганца, чугун с большим содержанием серы более склонен к отбеливанию при отливке в кокили, чем малосернистый чугун.

Влияние фосфора

Фосфор в качестве загрязняющей примеси присутствует во всех литейных чугунах, иногда он вводится намеренно с целью увеличения жидкотекучести.

В присутствии фосфора в структуре чугуна появляется новая составляющая, так называемый стэдит, состав которого в различных случаях неодинаков. В закаленных и половинчатых чугунах большая часть этой составляющей состоит из тройной эвтектики железа, цементита и фосфористого железа, тогда как в большей части серых чугунов главную массу ее составляет двойная эвтектика. В дальнейшем термин стэдит употребляется для всех соединений, богатых фосфором.

Стэдит представляет собой твердое, хрупкое соединение со сравнительно невысокой температурой плавления (около 955—980°). Он содержит около 10% Р и по своему удельному весу почти не отличается от чугуна. Таким образом в присутствии 1% Р в чугуне, последний содержит около 10% стэдита по объему. Как и следует ожидать, наличие значительного количества фосфора довольно заметно отражается на свойствах самого чугуна.

Влияние фосфора выражается в следующем.

1. Фосфор образует стэдит приблизительно в десятикратном количестве его процентного содержания. Будучи сравнительно легкоплавким, стэдит заметно увеличивает жидкотекучесть чугуна. Таким образом, при прочих равных условиях, чугуны с большим содержанием фосфора более жидкотекучи, чем малофосфористые.

2. По причине твердости стэдита увеличение содержания фосфора вызывает ухудшение обрабатываемости чугуна, что особенно заметно в высококачественных чугунах.

3. В нормальных практических пределах (0,15—0,90% Р) этот элемент не оказывает заметного действия на статическую прочность обыкновенных рыночных чугунов. В высококачественных чугунах содержание фосфора должно быть невелико. В связи со свойством стэдита принимать сетчатое строение чугуны с большим содержанием фосфора дают меньшую стрелу прогиба, чем чугуны малофосфористые. На величину среднего прогиба, характеризующего жесткость (rigidity), изменения в содержании

фосфора отзываются мало. По имеющимся данным, чугуны с большим содержанием фосфора более хрупки, чем чугуны того же типа, но с меньшим количеством фосфора. Это подтверждается и опытами Американского общества по испытанию материалов [ASTM, 2].

4. Фосфор способствует уменьшению содержания углерода в эвтектике в количестве около 0,3% С на каждый процент фосфора.

5. Увеличение содержания фосфора вызывает понижение начальной температуры застывания чугуна, понижение точки застывания эвтектики, повышение температуры застывания стэдита и не оказывает почти никакого влияния на температуру перлитового превращения.

6. Вследствие того что стэдит занимает определенный объем в металлической основе чугуна, вполне естественно, что по мере увеличения количества фосфора, уменьшается количество связанного углерода, потребного для образования эвтектоида или перлитовой основы.

7. Вообще говоря, фосфор несколько усиливает усадку, однако это действие совершенно незначительно по сравнению с влиянием графитизации.

8. Фосфор, повидимому, не оказывает заметного прямого действия на графитизацию, за исключением лишь случая очень мелкого литья.

СТРУКТУРНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ

Под микроскопом большинство сортов серого чугуна состоит, главным образом из графита, перлита, феррита и стэдита. В белых и половинчатых чугунах содержится свободный цементит и перлит (или какая-либо из его переходных форм). В половинчатых чугунах имеется также некоторое количество графита. Правильно отожженный ковкий чугун состоит из графита и феррита. Во всех чугунах, кроме того, имеются разного рода включения, из коих наиболее обычным является сернистый марганец. Так как механические свойства отливки зависят от структуры материала и от отсутствия в ней пороков, то изучение строения является настоятельно необходимым. Соотношение между различными составляющими в типичных чугунах показано в табл. 1.

Таблица 1
Соотношение между структурными составляющими в типичных чугунах

Обозначение		Химический состав, %						
		графит	связанный углерод	кремний	марганец	фосфор	сера	железо
Серый чугун	тип № 1	2,10	0,80	1,10	0,75	0,20	0,07	94,98
	" № 2	2,50	0,70	1,80	0,80	0,32	0,10	93,78
	" № 3	2,65	0,65	1,25	1,00	0,10	0,12	94,23
	" № 4	2,50	0,72	1,50	0,90	0,30	0,11	93,97
	" № 5	3,09	0,40	2,40	0,55	1,05	0,10	92,41
Белый чугун, тип № 6		—	3,30	0,60	0,52	0,50	0,15	94,93
Половинчатый чугун, тип № 7		1,50	1,80	0,92	0,36	0,22	0,13	95,07

Обозначение	Структурные составляющие, об. %							
	сизкофер- рит	перлит	сернистый марганец	стэнит	графит	сернистое железо	свободный цементит	вынеле- вый уде- льный вес
Серый чугун	тип № 1	6,36	84,59	0,35	2,00	6,70	—	7,34
	" № 2	15,65	72,84	0,49	3,15	7,87	—	7,23
	" № 3	21,98	67,89	0,60	0,98	8,35	—	7,25
	" № 4	12,98	75,64	0,54	2,96	7,88	—	7,25
	" № 5	39,14	40,75	0,48	10,12	9,51	—	7,08
Белый чугун, тип № 6 .		2,23	49,13	0,67	5,21	нет	0,09	42,67
Половинчатый чугун, тип № 7		3,30	72,71	0,45	2,23	4,84	0,21	16,26
								7,43

Природа структурных составляющих

Графит. С точки зрения структуры серый чугун состоит из металлической основы с пронизывающими ее многочисленными графитовыми включениями. Так как включения эти не обладают сами по себе прочностью и нарушают непрерывность (сплошность) металлической основы, то они в сильной степени ухудшают механические свойства чугуна. Действие графитовых включений зависит от их количества, размеров, формы и распределения. Удельный вес графита не велик (около 2,25), поэтому он занимает гораздо больший объем, чем это показывает обыкновенный весовой анализ. Так например, в чугуне, содержащем 3,0% графита по весу, последний занимает около 9,6% или больше по объему. Размеры отдельных включений различны, даже в одном и том же образце. Степень влияния графита во многом зависит от средней величины его включений. Значительная разница в размерах легко обнаруживается под микроскопом (фиг. 1—крупные графитовые включения, фиг. 2—более мелкие включения).

В зависимости от формы и распределения графитовые включения классифицируются на группы [3].

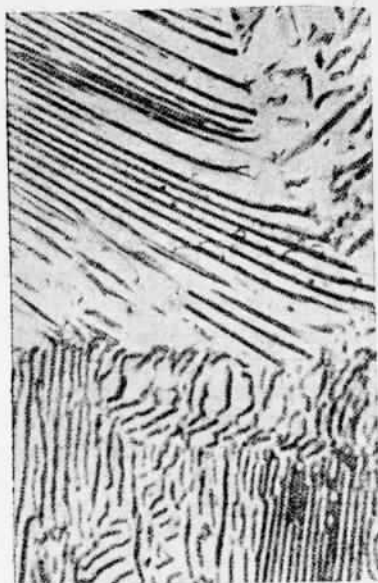
В редких случаях чугуны содержат только одну какую-либо разновидность графита, и потому характеристика чугуна по форме графита может быть только качественной. Тем не менее природа графитовых включений непосредственно связана с положением чугуна на диаграмме железоуглеродистых сплавов.

Под микроскопом графитовые включения видны только в одной плоскости, поэтому при суждении о влиянии различных по форме включений необходимо принимать во внимание их пространственные очертания.

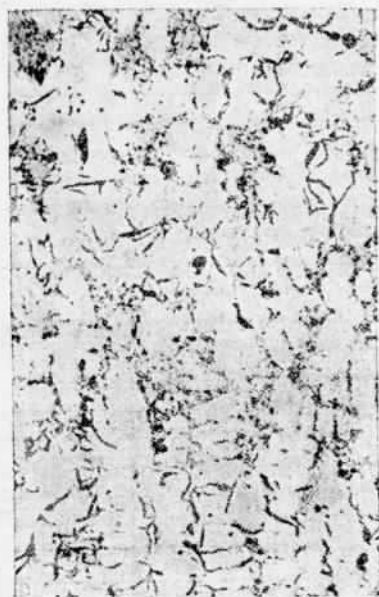
При прочих равных условиях: увеличение количества графита, увеличение размеров включений и неравномерность их распределения снижают прочность чугуна. При медленном охлаждении



Фиг. 1. Чугун с крупным графитом. Не травлено. $\times 100$



Фиг. 2. Чугун с мелким графитом. Травлено. $\times 100$.



Фиг. 3. Перлитовая структура чугуна. Травлено. $\times 100$



Фиг. 4. Феррит и ложно-эвтектический графит в окружении перлита. Травлено. $\times 100$

чугуны с большим содержанием графита зачастую имеют настолько неплотное строение, что на обработанных поверхностях кажутся изъеденными. Такой чугун плохо сопротивляется износу, если не низко удельное давление трения. При прочих равных условиях, малографитистые чугуны со сравнительно мелкими равномерно распределенными включениями имеют большую прочность на разрыв, более высокое число твердости по Бринеллю и более плотное строение. Для обеспечения качества чугуна необходимо, чтобы все факторы (количество графита, величина включений и распределение их) этому благоприятствовали. Нередко чугуны с мелкими отдельными включениями, распределенными неравномерно, могут показать более низкую прочность, чем чугуны с более крупными включениями, но распределенными более равномерно.

Перлит. В нормальных серых чугунах часть углерода, в химически связанном состоянии, входит в состав структурной составляющей, называемой перлитом (фиг. 3). Этот перлит, состоящий из чередующихся пластинок феррита и цементита, во многих отношениях схож с перлитом в углеродистых сталях. Вследствие присутствия некоторых составляющих, как например, графита и стьдита и значительных количеств кремния и марганца, перлитовая основа серых чугунов очень часто может содержать от 0,50 до 0,90% связанного углерода. «Чистый» эвтектоидный перлит в сплавах железа с углеродом содержит около 0,85% связанного углерода.

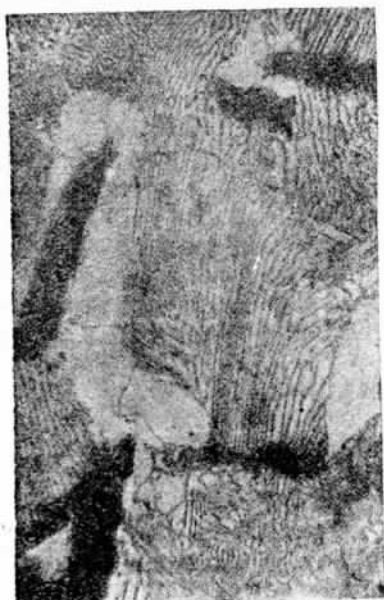
Значение перлитовой основы для качества серых чугунов очень велико. Перлитовая основа является желательной в высококачественных чугунах, однако она сама еще не обеспечивает высокой прочности или других требуемых свойств. Перлитовая структура литейных чугунов является сравнительно стойкой в довольно широких пределах колебаний состава чугуна и толщины стенок отливки. Перлит обладает значительной прочностью (временное сопротивление разрыву около 84 кг/мм^2) и довольно значительной твердостью (200—225, по Бринеллю). Большинство высококачественных чугунов имеет перлитовую или даже сорбитовую основу.

Нередко основное значение имеет количество графита и его характер. Отличное сопротивление серого чугуна износу достаточно общеизвестно. Опыты показывают, что в большинстве случаев наилучшим сопротивлением износу обладают высококачественные чугуны с перлитовой основой.

Феррит. При сравнительно большом содержании кремния или при медленном охлаждении, количество связанного углерода в чугуне может оказаться недостаточным для образования перлитовой основы. В таких случаях в металлической основе может образоваться структурно свободный феррит, располагающийся по границам графитовых включений. На фиг. 4 изображен образец чугуна с довольно большим содержанием кремния, состоящий из тесно перемешанных между собою феррита и мелкого графита, а на фиг. 5 — образец чугуна из толстостенной отливки (следовательно, охлажденный медленно) с крупными включениями графита, отороченными ферритом. Феррит сам по себе мягок, вязок и обладает лишь умеренной прочностью (временное сопро-



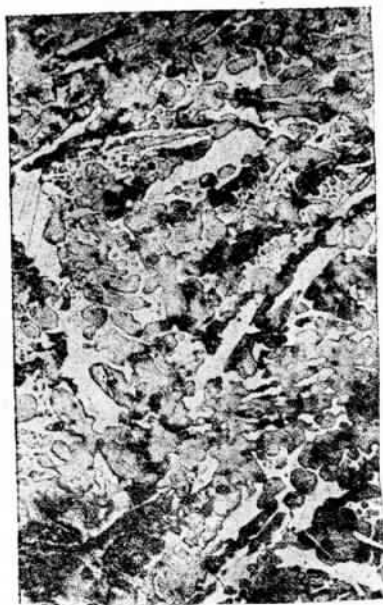
Фиг. 5. Толстостенное сечение отливки с крупным графитом в окружении феррита. Травлено. $\times 100$



Фиг. 6. Перлитовый чугун с ферритом вдоль графитовых включений. Травлено. $\times 1000$



Фиг. 7. Стэдит в чугуна. Травлено. $\times 735$



Фиг. 8. Структура половинчатого чугуна. Белые участки—цементит. $\times 1000$

тивление разрыву около 35 кг/мм^2 при удлинении в 40%). В серых чугунах непрерывность феррита в такой степени нарушается графитовыми включениями, что при прочих приблизительно одинаковых условиях серые ферритовые чугуны в значительной мере утрачивают вязкость, хотя, как правило, дают больший прогиб по сравнению с чугунами с перлитовой основой. Углерод в серых чугунах содержится в двух формах: в виде связанного, или углерода-перлита, и в виде свободного, или графита. Таким образом очевидно, что при данном общем содержании углерода количества перлита и графита находятся в обратном соотношении, другими словами, чем больше в чугуне графита, тем меньше перлита и наоборот. Присутствие феррита служит признаком меньшего количества перлита и повышенного содержания графита. Таким образом, ферритовые чугуны, содержащие меньшее количество наиболее твердой структурной составляющей — перлита и большее количество ослабляющего чугуна графита, не так прочны, как чугуны с перлитовой основой, при одном и том же количестве углерода и одинаковой толщине стенок отливки.

Структура серого чугуна, содержащего графит, феррит и перлит, показана на фиг. 6.

Стэдит. Природа фосфористой составляющей, или стэдита, была уже рассмотрена выше в разделе «Влияние фосфора». Стэдит в серых чугунах состоит, обычно, из двойной эвтектики железа и фосфида железа (фиг. 7), очень часто с некоторым избытком твердого раствора железа и фосфида железа. В отбеленных и половинчатых чугунах фосфористая составляющая состоит преимущественно из тройной эвтектики железа, фосфида железа и цементита. Во время графитизации серого чугуна цементит выходит из состава тройной эвтектики, и последняя превращается, таким образом, в двойную. Новейшие исследования показывают, что для завершения процесса превращения тройной эвтектики в двойную требуется довольно значительное время. В очень мелких отливках из серого чугуна наблюдаются иногда случаи частичного задерживания цементита в эвтектике, хотя свободный цементит не может быть обнаружен. В отсутствие связанного углерода фосфор, в количестве примерно до 1,7%, может растворяться в феррите. Таким образом, если серый чугун со стэдитом подвергнуть отжигу при температурах около 980° , фосфор растворится в феррите и обычными способами микроскопического исследования уже не обнаруживается (растворение происходит при 870° , а иногда даже и раньше, если время отжига для этого оказывается достаточным). Этим объясняется то, почему стэдит не обнаруживается в ковком чугуне, хотя в сером легко можно открыть его присутствие при наличии даже нескольких сотых долей процента фосфора.

При достаточном содержании фосфора и в определенных условиях охлаждения стэдит образует род сетки. Считают, что сетка эта служит необходимым условием прочности фосфористых чугунов.

Цементит и аустенит. Цементит представляет собой карбид железа состава Fe_3C с содержанием 6,67% C. Поэтому чугун,

содержащий 6,67% С (и резко закаленный во избежание распада цементита), состоит из цементита. Цементит является неустойчивой формой и сравнительно легко распределяется на свои составные части — железо и углерод (графит). Свободный цементит в больших количествах встречается только в белых и в половинчатых чугунах, где он обычно образует с аустенитом эвтектику, известную под наименованием лебедебурита. Микрофотография белого чугуна изображена на фиг. 8. Белые участки соответствуют цементиту. Цементит очень хрупок и имеет очень большую твердость (по всей вероятности, гораздо больше 550 по Бринеллю). Цементит полностью растворим в расплавленном железе, в твердом железе его растворимость ограничена.

Избыток цементита выпадает при застывании сплава, а остаток образует твердый раствор цементита (при температуре ниже точки затвердевания и выше точки перлитового превращения, иначе говоря, выше 727°), известный под наименованием «аустенит». Растворимость цементита в насыщенном аустените составляет приблизительно 0,85% при 727° и доходит до 1,7% при температуре затвердевания сплава. Следовательно, при охлаждении чугуна, содержащего насыщенный аустенит, выделяется цементита несколько больше (Кривая растворимости для цементита—аустенита точно еще не установлена).

В присутствии достаточного количества кремния и при медленном охлаждении в интервале от температуры затвердевания до температур значительно ниже 727° весь свободный цементит, а иногда и почти весь растворенный цементит может распасться на графит и феррит. Возможен, однако, случай, когда свободный цементит распался и насыщенный твердый раствор охладился до 727° , причем в нем осталось около 0,85% С или несколько меньше, как в рыночных сортах. При этой температуре происходит выделение тепла (явление рекалесценции), и при дальнейшем охлаждении ниже 727° насыщенный аустенит превращается в перлит. При температуре ниже 727° растворимость цементита в железе совершенно незначительна, и твердый раствор цементита в железе в виде аустенита существовать более не может. Поэтому происходит выделение цементита в виде пластинок, залегающих в ферритовой основе. Такое строение, показанное на фиг. 3 и состоящее из зерен феррита с многочисленными пластинками цементита, известно под названием «перлит». Перлит представляет собой эвтектоид—структуру, сравнительно постоянную по составу и образующуюся, как сказано выше, при определенной температуре.

Выводы. Углерод в расплавленном металле находится в виде растворенного цементита, или карбида железа Fe_3C . Растворимость цементита в твердом железе ограничена. В чугунах в интервале температур от точки затвердевания примерно до 727° часть цементита выделяется из раствора и образует свободную составляющую, так называемый свободный цементит. Остальной цементит находится в железе в виде твердого раствора, известного под названием аустенит. В присутствии кремния и при достаточно медленном охлаждении свободный цементит распа-

дается, причем одним из продуктов распада является графит. Если этот процесс распада дойдет до конца, получится серый чугун с перлитовой основой, в противном случае образуется половинчатый чугун.

Количество графита в чугуне зависит от содержания углерода в исходном металле и от степени распада цементита. Если распад свободного цементита и цементита, находящегося в твердом растворе, происходит полностью, то чугун будет состоять только из феррита и графита, если не считать стэдита и прочих включений. Если свободный цементит распался, а аустенит остался насыщенным при переходе температуры эвтектичного превращения, получается перлитовый чугун, состоящий из перлита и графита. Если происходит только частичный распад свободного цементита, образуется половинчатый чугун. Если свободный цементит совсем не распадается, получается белый чугун. Все эти процессы хорошо иллюстрируются диаграммой Совера [Sauveur, 4].

Величина графитовых включений, при прочих равных условиях, определяется скоростью охлаждения. К числу прочих факторов, определяющих величину графитовых включений, относятся химический состав чугуна и его «термическая история», иначе говоря, термические условия получения чугуна.

Характер включений графита в значительной мере зависит от положения сплава на диаграмме железоуглеродистых сплавов. Оказывается, что тот или иной характер включений в общем предопределяется формой цементита, из которого образовался графит.

Если бы было возможно связать результаты химического анализа серого чугуна непосредственно с данными структурного объемного анализа, иначе говоря, выявить точно существующие в чугуне структуры с занимаемыми ими относительными объемами, мы получили бы более ценные данные для сравнительной оценки и суждения о свойствах чугуна, чем те, которые дает обычный химический анализ. Примерный структурный состав некоторых типичных сортов чугуна приведен в табл. 1. Хотя и с некоторыми приближением, структурный анализ показывает, что серый чугун может содержать от 4 до 66% феррита плюс силицид железа в растворе, от 0 до 85% перлита, от 0 до 43% цементита, от 1,0 до 15% стэдита, от 0,10 до 0,67% сернистого марганца, от 0,06 до 0,21% сернистого железа и от 0 до 10,7% графита; при этом удельный вес может колебаться в пределах от 7,06 до 7,66.

Как отражаются на свойствах чугуна такие колебания состава, можно уяснить из рассмотрения свойств отдельных составляющих, приведенных в табл. 2.

ВЛИЯНИЕ МАССЫ И ТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ЧУГУНА НА ЕГО СТРУКТУРУ

Масса

Когда говорят о влиянии массы или толщины стенок отливки на свойства чугуна, то обыкновенно подразумевают под этим влияние, оказываемое скоростью охлаждения. Масса, сама по себе, не всегда является влияющим фактором. Так например, чу-

Таблица 2

Физико-механические свойства структурных составляющих соответственно таблице 1

Структурные составляющие	Удельный вес	Временное сопротивление разрыву кг/мм^2	Удлинение в % на длине в 5 см	Твердость по Бринеллю	Примечания
Феррит	7,86	35	40	95	Железо
Силицид железа ¹ (FeSi)	6,17	Низкое	Нет	—	1% Si. образует 3% силицида железа
Перлит	7,846	84	15	240	Пластинчатое строение с содержанием 6,5 частей мягкого железа или феррита на 1 часть цементита
Цементит (Fe_3C)	7,66	3,5	Нет	550 и более	Химическое соединение железа и углерода, содержащее 6,67% C
Стэдит	7,32	Нет	Хрупок	Очень тверд	Фосфид железа (Fe_3P) и насыщенный раствор (Fe_3P) в железе занимает почти десятикратный объем против весового содержания фосфора
Сернистый марганец	4,00	Нет	Хрупок	—	1,73 части марганца на 1 часть серы
Сернистое железо	5,02	Низкое	Хрупок	—	1,75 части железа на 1 часть серы
Графит	2,55	Нет	Связности нет	—	—

¹ Находится, главным образом, в виде твердого раствора в ферритовых чугунах, в нормальных как самостоятельная составляющая, не наблюдается.

гун с превосходным серым изломом в нормальном образце диаметром в 30 мм при заливке его в изложницу, охлаждаемую водой, со стороны в 50 мм, и при одинаковой длине с нормальным 30-мм образцом может дать структуру половинчатого или отбеленного чугуна.

Вопрос о скорости охлаждения в достаточной мере изучен, ниже приводятся выдержки из этой работы [5].

«Абсолютная скорость охлаждения зависит от целого ряда факторов, например, от начальной и конечной температур и состава сплава (что отражается до некоторой степени на теплоемкости), от скорости заливки, от величины отливки, от размеров охлаждающихся поверхностей, от теплопроводности самого сплава, от материала формы и от тех видов энергии, которые обнаруживаются при критических температурах.

«Скорость охлаждения не является прямой функцией. Действие перечисленных выше факторов еще более осложняется тем обстоятельством,

ством, что «конечная» температура представляет собой по существу очень сложное явление.

Так например, по мере охлаждения сплава происходит нагревание формы. Наряду с этим охлаждение по всему сечению какой-либо из стенок отливки происходит неравномерно. Другими словами, неодинаковые перепады температур между отливкой и теплопроводящим материалом, с одной стороны, и между различными слоями отливки, — с другой, делают невозможным выражение скорости охлаждения в пределах от температуры солидуса до нижней критической температуры в градусах в минуту (или в секунду). Однако даже самый незначительный перепад температур внутри отливки на практике оказывает очень серьезное влияние. Каждому литейщику приходилось наблюдать резко выраженные переходы в структуре изломов, вызываемые критическими перепадами температур, эти критические точки иногда очень резко выражены. В малокремнистых чугунах с большим содержанием фосфора это явление выражается особенно резко. В малоуглеродистых чугунах, а равно и в легированных никелевых чугунах, наоборот, такие резкие переходы в структуре наблюдаются реже. Таким образом эти последние чугуны вообще более однородны по своим физическим свойствам в различных сечениях одной и той же отливки. Элемент кремний имеет резко выраженный «химический критический перепад», отчего даже небольшие колебания в его содержании влияют на получение отбеленной и серой структуры.

«Для нашей цели вполне достаточно и гораздо проще остановиться на рассмотрении только относительной скорости охлаждения. При сравнительно близких друг к другу исходных температурах, при охлаждении отливок до температуры помещения и при теплоемкостях, не слишком отличающихся друг от друга, относительные скорости охлаждения, грубо говоря, пропорциональны отношению объема отливки к поверхности. Таким путем проще всего математически выражается общеизвестный факт, что скорость охлаждения пропорциональна толщине стенок. Или, иначе количество тепла, теряемого при охлаждении, зависит непосредственно от объема сплава, а скорость отвода тепла — от величины охлаждающейся поверхности».

Единственно надежным способом определения скорости охлаждения данного сечения отливки является измерение температур при помощи пирометра. Для большей части наиболее простых по очертанию отливок, полученных в одинаковых условиях, относительная скорость охлаждения может быть с достаточной степенью точности определена по отношению объема отливки к ее поверхности.

Влияние скорости охлаждения изображено на фиг. 9, составленной по данным Маурера и Гольцхаузена (Maurer, Holtzhausen). По мере удлинения срока охлаждения линии диаграммы, отвечающие определенному отношению углерода и кремния, смещаются влево. Маурер и Гольцхаузен нашли также, что образцы с диаметром в 30 мм, залитые в формы, подогретые до 250—450°, имели такую же структуру, как и образцы с диаметром в 76 и в 89 мм при заливке в холодные формы.

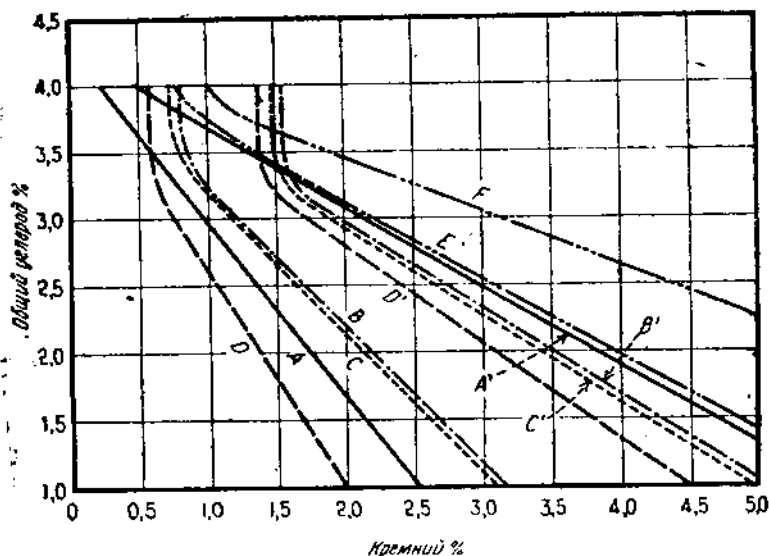
В серых чугунах графитизация свободного цементита при температурах, близких к точке затвердевания эвтектики, идет с большой скоростью. По мере понижения температуры процесс графитизации соответственно замедляется.

В течение этого периода — ниже температуры затвердевания эвтектики и выше точки перлитового превращения — происходит дальнейшее выпадение цементита из аустенита.

При температурах ниже точки перлитового превращения графитизация (цементита-перлита) идет медленно, так что, как правило, структура большей части чугунов остается перлитовой, ес-

ди только скорость охлаждения не слишком мала или содержание кремния и углерода не слишком велико. При температурах ниже 480° графитизация в большей части чугунов идет настолько медленно, что с точки зрения линейщика температуру 480° можно считать предельной для окончания процесса графитизации.

Очевидно, что в массивных отливках скорость охлаждения будет малой и графитизация более полной, особенно в чугунах с большим содержанием углерода и кремния, в которых процесс графитизации в толстых стенках нередко заходит так далеко, что в металлической основе образуется большее количество феррита.



Фиг. 9. Структура чугуна в зависимости от скорости охлаждения.

- А—А' — для 30-мм бруска, в залитого в сухую форму
 В—В' — " 75-мм " " " в кокиль
 С—С' — " 75-мм " " " в форму, нагретую до 250°
 D—D' — " 75-мм " " " " " " 450°
 E и F — " 75-мм " белого чугуна

В малоуглеродистых чугунах с надлежащим количеством кремния содержание связанного углерода остается примерно то же самое, независимо от толщины стенок. Такие чугуны, как говорят, в сильной степени обладают «квазиизотропией», и колебания в скорости охлаждения отзываются у них на изменении структуры не так сильно, — другими словами, изменение массы или толщины стенок в них сказывается слабее. Тем не менее эти изменения скорости охлаждения или «действие массы» отражаются на физических свойствах. Объясняется это тем, что при медленном охлаждении строение чугуна становится более крупнозернистым даже и в том случае, если содержание структурных составляющих останется одним и тем же. Это действие массы легко обнаруживается под микроскопом. Скорость охлаждения можно замедлить искусственно при особом расположении литни-

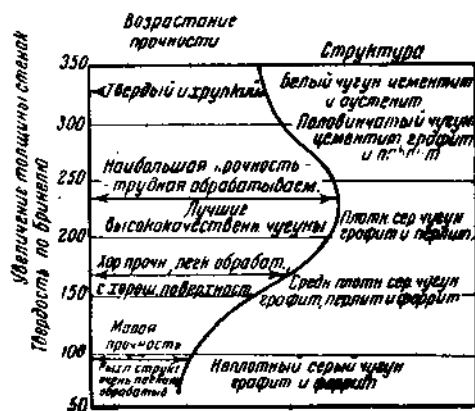
ков по способу Ронсере [Ronceray, 7], употреблением подогретых форм по способу Ланца, Зиппа и Дифенталера [Lantz, Sipp, Diefenthaler, 8], или ускорить при помощи холодильников.

Термическая история чугуна

Г. Эллиот [Elliott, 9], повидимому, первый обратил внимание на то, что перегрев сам по себе, оказывает влияние на свойства чугуна. Он нашел, что в перегретых чугунах требуется больше кремния для получения одинакового результата с ваграночными чугунами, в остальном не отличающимися по составу от перегретых.

Влияние перегрева изучалось неоднократно, и в результате этих исследований была создана гипотеза графитовых зародышей. Опыты показывают, что в чугунах, перегретых до $1495-1650^{\circ}$, последующая графитизация при охлаждении до известной степени затрудняется, и графит выделяется в более мелком виде, чем обыкновенно, причем выделения эти, повидимому, менее чувствительны к изменениям скорости охлаждения (толщине стенок), чем графит в обыкновенных ваграночных чугунах. Согласно теории графитовых зародышей, перегрев способствует полному

растворению графита, содержащегося в исходном штыковом чугуне. При отсутствии зародышей, действующих как центры кристаллизации, графитизация не может начаться раньше, чем температура упадет гораздо ниже эвтектической точки. Вследствие того что интервал графитизации при этом суживается, температура начала выделения графита понижена, графит выпадает в виде более мелких включений, и, без сомнения, наряду с этим частично карбид стабилизируется. На фиг. 10 изображена



Фиг. 10. Зависимость между структурой, скоростью охлаждения и физическими свойствами (Bolton a. Bornstein)

в общем виде зависимость между скоростью охлаждения и физическими свойствами чугуна.

Сильный перегрев в вагранке получить не так легко. Вероятно, для большей части американских вагранок температура в желобе в среднем не превышает 1455° и лишь в отдельных случаях достигает 1510° . Перегрев чугуна обычно производится в электрических печах или непосредственно после расплавления твердой заправки или путем дуэлекс-процесса, т. е. перегреванием чугуна, предварительно расплавленного в вагранке и перелитого в электрическую печь.

В известной степени структура чугуна зависит и от характера исходного материала, входящего в состав шихты. Добавка стали, например, оказывает сама по себе известное влияние, как это наблюдалось при сравнении плавок из шихт одного анализа, но состоявших из стали, штыкового чугуна и лома. Повидимому, это объясняется тем, что в присаживаемой стали нет графита.

ЛЕГИРОВАННЫЕ (СПЕЦИАЛЬНЫЕ) ЧУГУНЫ

Все чугуны по существу представляют собой сплавы. Обозначение «легированный чугун» применяется по отношению к тем только чугунам, в которые добавляются намеренно, с целью изменения физических свойств, такие элементы, как никель, хром, молибден и т. п. Обозначение «легированный чугун» в этом смысле подобно обозначению «легированная сталь».

Легированные чугуны часто применяются для отливок, предназначенных для работы в более тяжелых условиях, чем обыкновенно. Подобно тому как в производстве легированных сталей обязательным условием является тщательное соблюдение особых мер предосторожности при плавке, точно так же и в производстве легированных чугунов легирующие элементы должны присаживаться только к вполне доброкачественному основному сплаву, а не с целью исправления плохого чугуна. Нужно иметь в виду, что основная масса чугунного литья изготавливается из обычного нелегированного чугуна и, в большинстве случаев, вполне удовлетворительно выполняет свое назначение.

Никелевый чугун

Никель добавляется в серый чугун обычно в количествах от 0,5 до 5,0%, что в большинстве случаев является вполне достаточным. Нередко он присаживается в комбинации с другими легирующими элементами, как например, с хромом или молибденом.

Никель вводится в чугун с целью улучшения его обрабатываемости, твердости, плотности, жароупорных и антикоррозийных свойств. Подобно другим легирующим элементам никель требует к себе внимательного и осторожного отношения для достижения желаемых результатов. Никакой общей формулы для никелевых чугунов не выработано, и в каждом частном случае нужно подыскивать самостоятельное решение вопроса.

Никель способствует графитизации чугуна и карбидов не образует. В небольших количествах он противодействует отбеливанию и частично смягчает закаленный чугун путем удаления свободного твердого карбида, и тем самым способствует улучшению обрабатываемости чугуна.

При большем содержании (свыше 5%) никель увеличивает твердость чугуна (фиг. 11), образуя сорбит и даже мартенсит. Главная роль никеля как легирующего элемента в чугуне состоит в улучшении обрабатываемости. Присадка никеля дает возможность

получать отливки, которые по сравнению с обычным чугуном могут быть: 1) тверже, прочнее и с лучшей структурой при той же обрабатываемости или 2) обрабатываться легче при той же твердости, прочности и структуре.

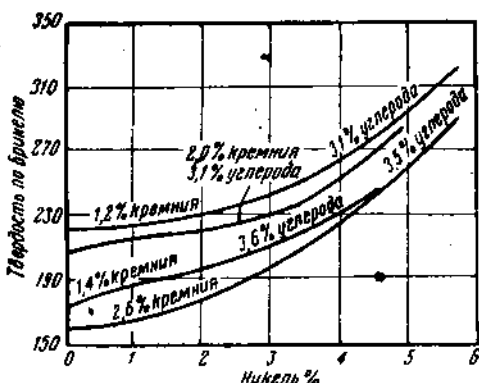
Никель придает чугуну плотность, уничтожает пористость, допуская применение малокремнистых чугунов без опасения отбеливания или образования твердых мест в тонких стенках.

При содержании не свыше 4% и при соответствующем составе чугуна никель способствует получению более однородной зер-

нистости, твердости и прочности в неоднородных по толщине стенках.

Зависимость между содержанием кремния, структурой и обрабатываемостью достаточно известна. Обрабатываемость может быть определена при помощи ступенчатых брусков, как показано на фиг. 12. Бруски ломают в различных местах, исследуют излом, испытывают твердость и определяют общее содержание углерода в различных сечениях. Зависимость

между отбеливанием и содержанием кремния показана на фиг. 12. На фиг. 13 показано влияние никеля на отбеливание. По мере



Фиг. 11. Влияние никеля на твердость серого чугуна по Бринеллю (P. D. Merica)

Таблица 3
Примерные составы¹ и свойства никелевых чугунов

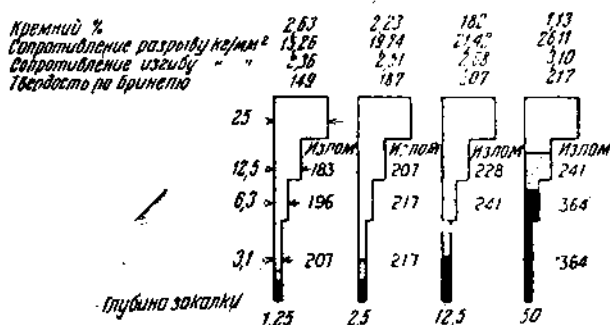
Род литья	Химический состав, %				Твердость по Бринеллю	Содержание стали в шихте, %
	общий углерод	кремний	марганец	никель		
Автомобильные цилиндры	3,25	1,80	0,65	1,25	180 ²	20
Чугун повышенной прочности	2,75	2,25	0,80	1,00	240	90
Паровозные цилиндры	3,00	1,10	0,85	1,25	200	50
Станины тяжелых станков	3,20	1,00	0,80	1,00	200	65
Корпуса насосов	3,30	1,50	0,65	1,25	200	30
Легкие шестерни	3,30	1,50	0,60	1,25	200	30
Тяжелые	3,00	1,00	0,75	2,00	220	50
Автомобильные поршни	3,40	2,50	0,65	1,00	180	15
Рамы дробилок	2,75	1,75	0,80	2,00	230	90
Элеваторные шкивы	3,00	1,00	0,80	1,25	220	50

¹ Приведенные составы не должны рассматриваться как технические условия.

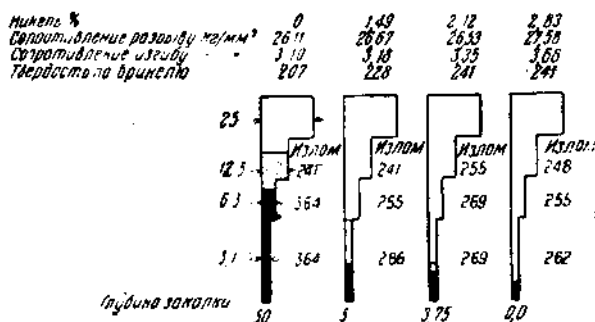
² Твердость на внутренних стенках.

увеличения содержания никеля наблюдается незначительное увеличение твердости и крепости в наиболее толстых сечениях, одновременно улучшается обрабатываемость тонких стенок, излом, которых постепенно становится более серым.

Никель дополняет кремний в отношении уменьшения отбеливания и тем самым дает возможность применять для литья мало-



Фиг. 12. Увеличение твердости чугуна за счет уменьшения содержания кремния. Ступенчатый образец



Фиг. 13. Увеличение твердости чугуна за счет добавки никеля. Ступенчатый образец (P. D. Merica)

кремнистые чугуны, которые без присадки никеля было бы трудно обрабатывать. Именно такая добавка никеля к малокремнистым чугунам и обеспечивает экономическую выгоду от его применения, так как, иначе, присадка никеля к чугуну, вообще говоря, экономически не оправдывается.

Коэффициент расширения никелевых чугунов по сравнению с обычным изменяется в зависимости от содержания никеля. При содержании меньше 5% он меньше, чем у обыкновенного чугуна, затем постепенно возрастает и при 20% Ni становится больше, чем в обыкновенном; начиная с 20 и вплоть до 35% коэффициент расширения уменьшается и при 28—29% Ni становится равным коэффициенту расширения обыкновенного чугуна. Затем при содержании никеля свыше 36% он снова увеличивается и при

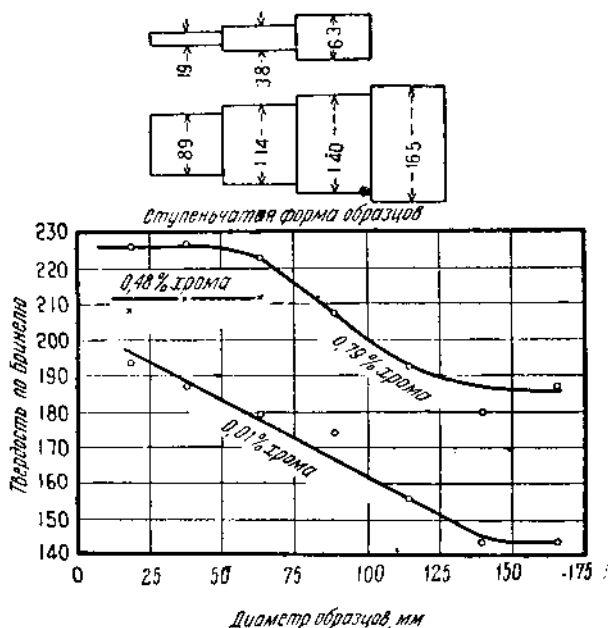
45—50% становится равным коэффициенту расширения обыкновенного чугуна.

По мере увеличения содержания никеля от 10 до 18% происходит постепенное изменение структуры в направлении к немагнитному γ -железу (аустениту), сопровождаемое соответствующим изменением свойств.

Аустенитовые серые чугуны, как например «нирезист» (14% Ni, 6% Cu, 4% Cr, 2% Si, 3% C) практически не обнаруживают роста и не дают окалины вплоть до 815°. Такие чугуны не разъедаются соляной, серной, уксусной, лимонной, борной и муравьиной кислотами, хлористыми и серноокислыми солями, щелочами, рассолами, морской водой, сероводородом, нефтью и т. п. Примерные составы никелевых чугунов приведены в табл. 3.

Хромистый чугун

Хром способствует образованию карбида в противоположность таким графитообразующим элементам, как кремний и никель. Хром способствует отбеливанию чугуна, увеличивает его твердость, жароупорность и, до известных пределов, прочность. Двойные карбиды хрома и железа более стабильны, чем простые карбиды железа и графитизируются хуже.



Фиг. 14. Влияние хрома на твердость при изменении толщины стенок

Хром присаживается к чугуну, главным образом, в тех случаях, когда требуется увеличить твердость чугуна или сопротивление износу, например в чугунах с 2,25% Si и 3,40% C. Чугун такого состава пригоден для большинства отливок, но для более круп-

ных отливок и для некоторых отливок средней толщины не пригоден, если требуется высокое сопротивление износу. В этих случаях добавка хрома в количестве от 0,40 до 1,00% бывает часто очень полезной. В крупных отливках хром способствует получению более равномерной твердости в стенках разной толщины, как показано на фиг. 14.

В табл. 4 показано влияние хрома на мягкий чугун.

Таблица 4

Влияние хрома на мягкий чугун

Количество хрома %	Структура
0	Феррит и крупный графит
0,30	Меньше феррита, более мелкий графит и перлит
0,60	Мелкий графит и перлит
1,00	Мелкий графит и перлит и небольшие включения карбида
3,00	Графит отсутствует
5,00	Много свободного карбида
10,00—30,00	Мелкие карбиды

Хром препятствует выделению графита и вызывает измельчение графитовых включений. С другой стороны, хром способствует образованию мелкопластинчатого и более твердого перлита. При соответствующих свойствах основного чугуна прочность его увеличивается, зерно измельчается, а твердость возрастает. Влияние хрома на число твердости по Бринелю и на содержание связанного углерода в сером чугуне показано на фиг. 15.

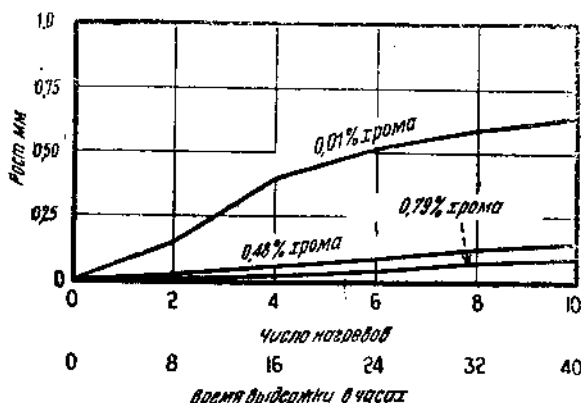
При содержании хрома свыше определенного предела, примерно около 1%, в отливках из мягкого чугуна со средней толщиной стенок образуются свободные карбиды, ухудшающие обрабатываемость чугуна. При 3% Cr и при отсутствии графитизирующих элементов вроде никеля чугун получается совершенно белым. Для получения белого чугуна специального назначения, особо вязкого или отбеленного и не дающего окалина, можно допустить повышенное содержание хрома. Был проведен ряд опытных работ по изучению чугунов с 15—35% Cr, такие чугуны показали



Фиг. 15. Влияние хрома на твердость и содержание связанного углерода в сером чугуне (Trantín)

хорошие результаты в смысле жароупорности и антикоррозийных свойств. 1,25%Cr предотвращает рост чугуна при температурах до 700° (в условиях, сходных с работой обычных колосников).

Хром в чугуне способствует увеличению временного сопротивления при повышенных температурах и уменьшает способность чугуна к росту. Зависимость роста чугуна от содержания хрома показана на фиг. 16.



Фиг. 16. Влияние хрома на рост чугуна при повторном нагреве и охлаждении с 590° (С. О. Burgess)

Способность хрома стабилизировать карбид оказывается полезной при термической обработке серого чугуна, так как улучшения, вызываемые изменением структуры основной массы, не уменьшаются за счет чрезмерной графитизации.

В табл. 5 приведено несколько типичных анализов хромистых чугунов для разного рода литья.

Таблица 5

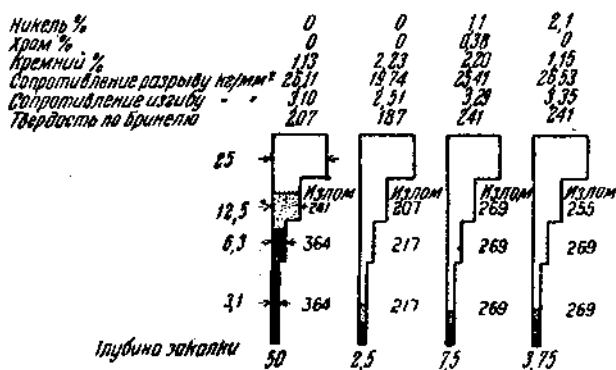
Примерные составы¹ и применение хромистых чугунов

Назначение литья	Химический состав, %		
	общий углерод	кремний	хром
Отжигательные ящики	1,80	1,25	26,0
Изложницы	3,10	2,00	1,0
Щеки дробилок	2,00	1,00	25,0
Печное литье	2,25	2,00	15,0
Формы для стекла	3,25	2,00	0,60
Шаги и плиты для мельниц	до 3,5	до 2,0	3,0
Жароупорное литье:			
а) для температур не выше 700° (горшки, печные решетки и пр.)	3,5	2,25	1,25
б) для температур не выше 580°	2,5	2,5	15—30
Шестерни	3,25	1,75	0,75

¹ Приведенные в таблице составы не должны рассматриваться как технические условия.

Хромоникелевые серые чугуны очень разнообразны по своему составу в зависимости от назначения отливок. В среднем они содержат не свыше 3,0% Ni и 1,0% Cr. Никель и хром присаживаются вместе к серому чугуну прежде всего с целью придания чугуну более мелкозернистой структуры, увеличения его твердости и прочности без ухудшения обрабатываемости.

Для придания закаленному или белому чугуну особо большой твердости, прочности и вязкости в чугун вводят около 4,5% Ni и 1,5% Cr. Твердость такого чугуна равна 600—750 по Бринелю, тогда как в соответствующем сорте обычного закаленного или белого чугуна она лежит в пределах 380—530.



Фиг. 17. Увеличение твердости серого чугуна за счет добавки никеля и хрома в уравнивающей пропорции и сравнение никель-хромового чугуна с никелем. Ступенчатый образец (P. D. Merica)

Никель и хром обычно добавляются к чугуну в таких количествах, чтобы каждый из них мог нейтрализовать отбеливающее действие кремния. Получающийся легированный чугун в отношении отбеливания ведет себя так же, как обычный исходный нелегированный чугун, и обрабатываемость отливок из такого чугуна должна быть такой же, как и у отливок из нелегированного чугуна. В то же время влияние никеля и хрома на образование более мелкозернистой структуры, увеличение твердости и прочности основной массы сохраняется в полном объеме и отражается на структуре и свойствах чугуна. Зависимость между свойствами чугуна и содержанием никеля и хрома иллюстрируется фиг. 17.

Обычно никель и хром добавляются к чугуну в пропорции 2,5:1. Такое соотношение обеспечивает хорошие результаты в смысле обрабатываемости и физических свойств. Добавки делаются и в других пропорциях, в зависимости от сорта исходного чугуна и от назначения отливки.

Хромоникелевые чугуны применяются в промышленности в тех случаях, когда от отливки требуется улучшенная структура, более высокая твердость, сопротивление износу или высокая прочность. Совместная присадка никеля и хрома зачастую оказывает

ся более удобной, чем добавка одного никеля, так как при этом не требуется изменения состава шихты и изменения процесса, в отличие от присадки одного лишь никеля, требующего изменения ваграночной шихты (уменьшение количества кремния). Нередко добавка никеля и хрома оказывается дешевле, чем одного никеля. Добавки никеля и хрома, присаживаемых к серому чугуну с целью увеличения его твердости и прочности, колеблются на практике в следующих пределах (%):

	Ni, %	Cr, %
Наименование добавки	0,10—0,50	0,10—0,25
Средние	0,75—1,50	0,25—0,50
Наибольшие	2,00—3,00	0,50—1,00

Типичные состав хромоникелевых чугунов указаны в табл. 6.

Таблица 6

Примерные составы¹ и применение хромоникелевых чугунов

Род литья	Химический состав %					Твердость по Бринеллю	Содержание стали в шихте, %
	общий углерод	кремний	марганец	никель	хром		
Легкие автомобильные цилиндры	3,30	2,10	0,60	0,75	0,30	200	20
Тяжелые автомобильные цилиндры	3,30	1,85	0,65	1,50	0,60	220	25
Легкие кузнечные штампы	3,30	1,50	0,60	1,50	0,60	300 ²	30
Тяжелые штампы	3,00	1,25	0,60	2,75	0,80	300 ³	50
Тормозные барабаны	3,25	2,00	0,65	1,50	0,60	220	20
Гильзы для легких цилиндров	3,25	2,00	0,60	1,50	0,60	220	25
Горшки для каустика	3,30	0,70	0,50	1,50	0,60	230	35
Муфты	3,30	2,10	0,65	1,25	0,40	220	15
Постоянные формы	3,25	1,75	0,60	1,50	0,60	220	25

¹ Приведенные составы не должны рассматриваться как технические условия.

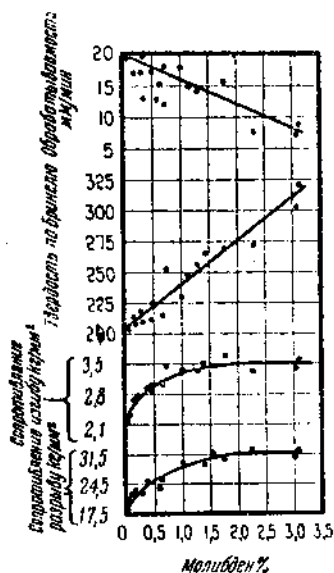
² Термическая обработка: закалка в масле при 855°, отпуск при 425—595°.

³ Термическая обработка: закалка в масле при 845°, отпуск при 425—595°.

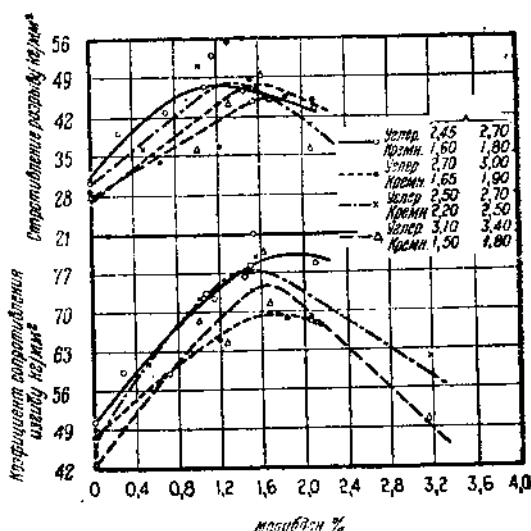
Молибденовый чугун

Молибден в чугуне образует комплексные карбиды и твердый ферритовый раствор. Как карбидообразователь он уступает хрому по силе своего действия. Молибден оказывает благоприятное влияние на форму графитовых включений, сообщая им зернистое

строение и соответственно улучшая физические свойства чугуна. Молибден в чугуне увеличивает временное сопротивление разрыву и изгибу, стрелу прогиба и твердость. Обычно молибден добавляется в количестве от 0,25 до 1,25%. В отношении увеличения прочности серого чугуна молибден является наиболее активным легирующим элементом.



Фиг. 18. Влияние молибдена на свойства серого чугуна (Smith)



Фиг. 19. Влияние молибдена на прочность чугуна (Musatti и Colbiani)

При содержании молибдена до 1,5% сопротивление разрыву и изгибу возрастают. При дальнейшем увеличении количества молибдена сверх 2% замечается уменьшение прочности (фиг. 18 и 19). На основании ряда исследований, молибден улучшает сопротивление чугуна износу. Строение чугуна в толстых стенках под влиянием молибдена становится более однородным, в результате чего хорошая плотность, твердость и прочность обеспечивается по всему сечению (фиг. 20).

Молибден задерживает критические точки как в жидком, так и в твердом чугуне. В силу этого изменения объема менее резки и графитизация протекает медленнее, что помогает при термообработке и способствует сохранению прочности при повышенных температурах.

При правильном применении молибдена можно получить чугун с удовлетворительной обрабатываемостью. По всей вероятности, молибден не оказывает почти никакого влияния на антикоррозионные свойства чугуна. Молибден можно добавлять к чугуну с другими легирующими элементами или без них. Нередко вместе с молибденом вводят в чугун хром или никель, или одновременно хром и никель.

Типичные составы молибденовых чугунов приведены в табл. 7.

Таблица 7

Примерные составы молибденовых чугунов

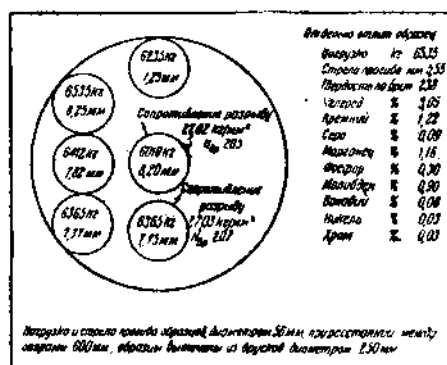
Назначение литья	Химический состав, %					
	общий углерод	кремний	марганец	молибден	никель	хром
Тормозные барабаны	2,75	2,25	0,70	0,50	—	—
Легкие кузнечные штампы	3,30	2,05	0,60	1,00	—	—
Тяжелые штампы	3,10	1,50	0,60	1,00	—	—
Поршни автомобильные	3,35	2,25	0,65	0,40	—	—
Чугун высокой прочности	2,80	2,20	0,80	0,35	—	—
Автомобильные цилиндры	3,20	2,10	0,60	0,35	—	—
Автомобильные цилиндры	3,20	2,30	0,60	0,35	—	0,30
Изложницы	3,50	1,20	0,75	0,50	—	—
Автомобильные отливки (высокой прочности)	3,00	2,35	0,80	0,50	0,40	0,40

¹ Приведенные составы не должны рассматриваться как технические условия.

Ванадиевый чугун

Ванадий присаживается к чугуну в количестве от 0,10 до 0,50 %. Действие ванадия на чугун выражается в следующем.

1. Ванадий препятствует графитизации чугуна, другими словами, стабилизирует цементит.



Фиг. 20. Свойства молибденового чугуна в зависимости от толщины стенок. Отдельно отлитый образец диаметром 55,88 мм (2,2") (Mackenzie)

2. Способствует измельчению графита и более равномерному его распределению.

3. Способствует образованию сорбитового строения.
4. Способствует получению мелкозернистой основной массы.
5. Способствует образованию более мелких и менее резко выраженных дендритов в верхних слоях заклённых отливок. Вследствие этого и в связи со стабилизацией цеменита, закалка распространяется глубже, а закаленный слой делается более твердым и вязким и лучше сопротивляется износу.

Перечисленные свойства ванадия являются следствием, главным образом, его способности стабилизировать карбид. Из числа карбидообразователей ванадий считается наиболее сильным, причем образующиеся карбиды устойчивы при сравнительно высоких температурах.

Ванадиевые чугуны применяются для различных целей. Типичные составы таких чугунов приведены в табл. 8.

Таблица 8

Примерные составы¹ ванадиевых чугунов

Род, литья	Химический состав, %							
	углерод общий	кремний	марганец	сера	фосфор	ванадий	хром	никель
Колошники	3,68	1,72	0,53	0,09	0,43	0,14	—	—
Пор. возм. цилиндры	3,47	1,54	0,53	0,10	0,49	0,13	—	—
Штампы	3,40	1,30	0,50	0,08	0,23	0,12	—	—
Прокатные валки . .	3,50	1,10	1,20	0,10	0,20	0,35	1,85	4,00
Бутылочные формы .	3,30	1,65	0,60	0,07	0,30	0,14	—	—

¹ Приведенные составы не должны рассматриваться как технические условия.

Чугун с добавкой меди, титана, алюминия и циркония

Медь вводится иногда в чугун в количестве до 1% с целью улучшения антикоррозийных свойств чугуна, особенно при действии на него воды, разведенных кислот и растворов солей. Медь способствует увеличению вязкости и твердости, а также несколько улучшает обрабатываемость.

Титан способствует графитизации чугуна подобно кремнию, но по своей активности превосходит кремний (при небольшом содержании). В связи с усилением графитизации происходит и усиленное образование феррита, а вместе с тем ослабевает способность чугуна к отбеливанию. Доказано также, что титан в чугунах является раскислителем и очистителем.

В комбинации с хромом титан применяется для получения мелкозернистой структуры.

Алюминий. В малокремнистых чугунах алюминий действует как сильный графизатор. Даже при незначительной добавке в белый чугун алюминия, или алюминия с кремнием начинается усилен-

ная графитизация. При содержании от 1,0 до 1,75% Al чугуны приобретают чрезвычайно большую твердость при азотировании. Недостатком алюминиевых чугунов при заливке является образование на поверхности жидкого чугуна, вязкой пленки окисла, которая постепенно делается толще и образует неплотности в отливках.

Цирконий. При надлежащем составе чугуна с небольшим содержанием кремния цирконий способствует улучшению физических свойств. В количестве от 0,10 до 0,30% он раскисляет чугун и увеличивает его прочность и сопротивление удару.

Небольшие количества сплава циркония с кремнием сильно способствуют графитизации белых чугунов.

III. СВОЙСТВА ЧУГУНА

ОБЗОР СВОЙСТВ

Чугун находит широкое применение в машиностроении и в родственных областях промышленности, благодаря удобству и простоте получения из него здорового литья, его дешевизне и разнообразию физических свойств. Возможность получения тех или иных свойств, вообще говоря, не всегда используется на практике в должной мере, большей же частью с целью снижения стоимости литья. Это обстоятельство объясняется недостаточным знанием свойств чугуна, а до известной степени и отсутствием надлежащих способов испытания. За последние десять лет положение дела резко изменилось.

Ниже приводится краткий обзор свойств различных типов серого и белого чугунов. Подробно эти свойства рассмотрены ниже в соответствующих разделах.

Сопротивление разрыву. Прочность на разрыв считается самым важным свойством. При правильном проведении испытания получают сравнимые и надежные результаты. В среднем временное сопротивление разрыву лежит в пределах от 14 до 42 кг/мм².

Сопротивление сжатию. Обыкновенно прочность на сжатие примерно в три раза больше прочности на разрыв для твердых чугунов и раз в пять — для мягких. Для серого чугуна прочность на сжатие колеблется в пределах от 49 до 140 кг/мм².

Коэффициент сопротивления изгибу и стрела прогиба. Испытание чугуна на изгиб является самым распространенным и применяется в качестве контрольного испытания литья. Как указано ниже, коэффициент сопротивления чугуна изгибу гораздо больше, чем при разрыве.

При испытании серых чугунов на образцах до 30 мм диаметром и при расстоянии между опорами в 457 мм (18") величина разрушающей нагрузки колеблется от 590 до 1900 кг при прогибе от 4 до 10 мм.

Серый чугун не подчиняется в точности закону Гука. Модуль упругости при напряжении, равном 25% от временного сопротивления разрыву, колеблется от 840 000 кг/мм² для слабых чугунов до 1 260 000 кг/мм² и выше для крепких. Точно определенного предела упругости нет. Серые чугуны могут выдержи-

вать без разрушения статическое напряжение, равное примерно 80% или больше их временного сопротивления разрыву.

Прочность на срез. Прочность на срез примерно равна временному сопротивлению разрыву для более крепких чугунов и превосходит примерно в 1,6 раза в чугунах слабых для серого чугуна прочность на срез колеблется от 17,5 до 75 кг/мм².

Предел усталости или выносливости. Предел усталости равен примерно 42—57% от временного сопротивления разрыву в зависимости от типа чугуна. Для большей части обычных серых чугунов он равен приблизительно 6,3—18,2 кг/мм². В специальных высококачественных чугунах предел усталости пропорционально повышается.

Сопротивление удару. Вообще говоря, чугун не должен работать на удар. Различные чугуны сильно разнятся между собою по их сопротивлению удару. Определенной зависимости между сопротивлением удару и сопротивлением разрыву или изгибу не установлено.

Можно считать, что по мере увеличения сопротивления разрыву и изгибу возрастает и сопротивление удару. Большое влияние на величину сопротивления удару оказывает форма и количество графита.

Твердость. В известных пределах твердость чугуна предопределяется способом его получения, составом и скоростью охлаждения и застывания. Термическая обработка дает возможность расширить предел получаемой твердости. Твердость колеблется от 100 по Бринелю или несколько выше в полностью отожженном чугуне почти до 450 в обыкновенном закаленном. В некоторых же сортах специально закаленного и термически обработанного чугуна твердость достигает 700 по Бринелю.

Жароупорность. Обыкновенные чугуны сохраняют свою прочность примерно до 455°. Специальные, или легированные чугуны способны выдерживать нагрев до 980°.

Сопротивление износу. Серый чугун обладает исключительной стойкостью против износа и особенно отличается отсутствием заедания при трении. Частично это обстоятельство зависит от самосмазывающей способности графита. В условиях истирания твердость, присущая белому или закаленному чугуну, является свойством очень желательным.

Обрабатываемость. По своему составу, строению и физическим свойствам чугуны очень разнообразны, и в зависимости от этих факторов меняется в широких пределах способность чугуна к обработке, или его обрабатываемость, начиная от чугунов очень легко обрабатываемых до таких, которые поддаются обработке с трудом.

Легкость обработки обычно обратно пропорциональна прочности отливки. Закалка, обработка специальными сплавами, термическая обработка и специальные способы производства могут изменять обрабатываемость в ту или в другую сторону.

Сопротивление коррозии. В нормальных условиях обыкновенный чугун (углеродистый) сравнительно хорошо сопротивляется коррозии. Для более жестких условий применяются легирован-

ные чугуны, доказавшие уже свою исключительную стойкость в целом ряде областей, где коррозия является одним из главных факторов.

Влияние массы. Механические свойства — сопротивление разрыву, изгибу, сжатию, усталость и твердость — сильно зависят от толщины стенок. В новейших способах испытания этот фактор — влияние толщины стенок — принимается во внимание. Современные литейные чугуны, получаемые в условиях строгого контроля, менее чувствительны к толщине стенок, чем это было раньше, особенно это относится к высококачественным перлитовым чугунам.

Электрические и магнитные свойства (см. ниже).

Удельный вес. Удельный вес чугунов колеблется от 7,00 в чугунах с крупнозернистым строением до 7,70 в белых.

Тепловые явления. 1. Плавление. Так как чугуны состоят из различных структурных составляющих, то они не имеют определенной температуры плавления. Серые чугуны с большим содержанием фосфора могут начать плавиться примерно при 955° (температура плавления $\sigma\epsilon\delta\text{ита}$). Обычные серые чугуны плавятся в интервале температур от 1095 до 1315° .

2. Теплоемкость при нормальной температуре может быть принята равной средней теплоемкости его составляющих.

3. Теплопроводность по мере повышения температуры падает. В интервале от 10 до 230° она равна примерно $0,108\text{--}0,149$ кал/см² при разнице температур в 1° .

4. Сокращение размеров в твердом состоянии или усадка. Усадка серого чугуна для модельного усадочного метра принимается в $10,5$ мм на длине в 1 м (на практике 1%), а для белого 21 мм (на практике 2%). В зависимости от состава чугуна, от вида и размеров модели усадка может быть различной, поэтому приведенные цифры не следует считать совершенно точными.

5. Коэффициент термического расширения при температуре помещения можно считать равным $0,000010$ на каждый градус.

6. Жароупорность, рост и крип (ползучесть). Обыкновенные чугуны хорошо выдерживают температуру до 340° , но в некоторых случаях, при более сильном нагреве, чугун начинает расти. В настоящее время специальные (легированные) чугуны способны выдерживать нагрев до 980° .

7. Термическая обработка. Чугунные отливки могут подвергаться разного рода термической обработке, например: закалке, томлению, азотированию, старению, для уничтожения внутренних напряжений или отжигу для снижения твердости в целях улучшения обрабатываемости.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ (КОНСТАНТЫ)

Температурные интервалы плавления и затвердевания

Зегер и Аш [Saeger и Ash, 10] при изучении объемных изменений определяли температуру ликвидуса и получили результаты, сведенные в табл. 9 для восьми чугунов, из которых последний — половинчатый.

Температурные интервалы плавления и затвердевания типичных чугунов

	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
Ликвидус, °С	1150	1150	1150	1155	1195	1250	1250	1350
Углерод, %	3,72	3,66	3,50	3,27	2,90	3,08	3,10	2,24
Кремний, %	2,10	2,87	2,86	2,87	2,88	1,68	1,69	1,24
Фосфор, %	0,46	0,68	0,67	0,59	0,66	0,35	0,35	0,27

Как оказалось, температурой солидуса для всех этих чугунов нужно считать 715°.

Резер и Спенсер (Roeser, Spencer) измерили практическую температуру затвердевания двадцати пяти чугунов, перечисленных в недавно изданном отчете Комитета при Американском обществе испытания материалов [2].

За температуру затвердевания принималась та температура, которую показывал пирометр по крайней мере при четырех последовательных отсчетах через 15-секундные интервалы в образце 10 × 10 × 20 см, отлитом в открытую песчаную форму. В тех случаях, когда не удавалось подметить определенной температуры затвердевания, за таковую принималась та температура, при которой затвердевающий чугун начинал схватывать трубку термомпары. Результаты испытаний приведены в табл. 10 в порядке возрастания температур.

Таблица 10

Температуры затвердевания чугунов различного химического состава

Температура застывания, °С	Химический состав, %						
	углерод общ.	кремний	фосфор	никель	хром	медь	молибден
1105	3,25	2,08	1,99	—	—	—	—
1133	3,61	2,06	0,75	—	—	—	—
1137	3,53	1,67	0,68	—	—	—	—
1139	3,41	2,44	0,63	—	—	—	—
1140	3,49	1,68	0,74	—	—	—	—
1142	3,07	1,97	0,40	—	—	—	—
1145	3,08	2,07	0,04	16,29	1,89	6,12	—
1152	3,49	2,08	0,19	1,17	0,65	0,32	—
1158	3,95	1,90	0,07	—	—	0,32	—
1163	3,79	1,47	0,12	—	—	0,21	—
1164	3,52	2,94	0,04	—	—	0,34	—
1164	3,46	2,35	0,15	0,65	—	—	—
1170	2,79	2,44	0,03	0,50	0,09	—	Обработано силицидом кальция

Температура застывания, °С	Химический состав, %						
	углерод общ.	кремний	фосфор	никель	хром	медь	молибден
1172	3,38	1,18	0,14	—	—	—	—
1172	2,88	1,99	0,43	—	—	—	—
1172	3,43	2,35	0,20	—	—	—	—
1173	3,14	2,69	0,18	0,25	0,09	—	0,07
1174	3,12	2,18	0,63	—	—	—	—
1175	3,39	2,50	0,43	—	—	—	—
1177	3,25	1,63	0,42	—	—	—	—
1180	3,49	0,53	0,33	—	—	—	—
1181	3,05	2,70	0,16	0,60	0,24	—	0,45
1214	2,61	2,38	0,06	1,08	0,09	—	—
1218	2,50	2,20	0,04	—	0,08	—	—
1223	2,53	3,25	0,02	10,59	1,55	4,07	—

Температура плавления серого чугуна всегда несколько превышает температуру затвердевания. Эта разница зависит от скорости нагрева и от величины графитовых включений. Если бы можно было нагреть серый чугун до температуры его плавления мгновенно, то он должен был бы расплавиться при той же самой температуре, при которой плавится и сталь, содержащая углерод в количестве, равном содержанию связанного углерода в данном чугуне (также кремния, фосфора и т. д.). Так как такой нагрев в условиях литейного цеха не осуществим, некоторое количество графита успевает снова раствориться раньше, чем окончится плавление. Чем быстрее нагревается чугун и чем крупнее включения графита, тем труднее он переходит в раствор и тем, следовательно, выше температура плавления чугуна. Мольденке (Moldenke) доказал это опытным путем, нагревая в мартеновской печи чушки серого и белого чугуна одновременно. Белый чугун начинает плавиться всегда раньше серого чугуна при той же толщине.

Удельная теплоемкость

Удельная теплоемкость при нормальных температурах может быть принята равной средней теплоемкости структурных составляющих чугуна.

Для доменного чугуна, содержащего 4,22% С, 1,48% Si, 0,12% Р, 0,73% Mn и 0,03% S, Умино (Umino) дает следующие цифры теплоемкости в зависимости от температуры (табл. 11).

Скрытая теплота плавления, по данным Умино, равна 47 кал. По данным Резера удельная теплоемкость доменного чугуна при 1350° равна 0,23. Теплоемкость чугуна по Международным таблицам в интервале температур от 0 до 100° равна 0,13.

Теплоемкость при различных температурах

°C	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Средняя теплоемкость	0,131	0,134	0,137	0,140	0,142	0,148	0,154	0,168	0,172	0,175	0,178	0,219	0,218

Жидкотекучесть

Тильман и Виммер [Thielmann, Wimmer, 12] приводят следующие значения вязкости железоуглеродистых сплавов с содержанием 0,1% Si, 0,5% Mn, 0,12% P и 0,06% S.

Содержание углерода, %	Сантимуазы при			
	1250°	1300°	1350°	1400°
2,5	—	—	2,7	2,3
3,0	—	2,8	2,4	2,0
3,5	2,9	2,4	2,0	1,8
4,0	2,1	1,8	1,6	1,5

Таблица ясно показывает, как влияет температура и количество углерода на жидкотекучесть чугуна. Работы Бергера [Berger, 13] показывают, что жидкотекучесть возрастает линейно до нескольких десятых долей процента эвтектики: круто поднимается до эвтектики и затем резко падает. Так предполагал в свое время и Спенсер, но Бергер доказал это совершенно определенно.

Жидкотекучесть, повидимому, может быть практически определена по формуле:

$$\text{Жидкотекучесть} = \frac{\text{темп. зал.} - \text{темп. затв.}}{\text{темп. затв.} - \text{темп. формы}}$$

Объемные изменения в отливке

Сложность вопроса состоит в том, что выделение графита связано со скоростью охлаждения, зависящей от свойств формы или толщины стенок отливок. Чем больше выделяется графита, тем меньше изменение объема в интервале от температуры затвердевания до температуры помещения.

Самые полные и надежные данные по вопросу об объемных изменениях приводят Зегер и Аш [10] (см. табл. 12). Из рассмотрения таблицы следует, что при 1150 до 1070° все чугуны заметно увеличиваются в объеме, что объясняется не только графитизацией, так как и белые чугуны при этих температурах так-

Объемные измерения в чулках

Физические постоянные и химический состав	№ чулков															
	УШ		VII		I		IV		IX		XIII		II		III	
	38	19	38	19	38	19	38	19	38	19	38	19	38	19	38	19
Диаметры образцов, мм																
Линейная усадка, начиная от 1150°, %	0,67	1,08	0,83	1,08	0,93	1,13	0,95	1,11	0,97	1,08	0,98	1,09	1,06	1,11	1,08	1,12
Линейная усадка, начиная от 1070°, %	0,90	1,17	1,04	1,14	1,13	Н.о.	Н.о.	1,22	1,12	1,19	1,03	1,13	1,24	1,25	1,19	1,21
Усадка при затвердении, %	0,07	1,65	0,62	1,11	Н.о.	Н.о.	1,94	1,73	0,82	1,10	0,07	1,31	Н.о.	Н.о.	1,59	1,94
Усадка в жидком состоянии на каждые 100°, %	1,1		1,1		Н.о.		1,1		1,1		1,1		Н.о.		1,1	
Плотность при комнатной температуре, г/см³	7,02	7,01	7,09	7,10	7,10	7,13	7,26	7,29	7,03	7,04	7,08	7,08	7,12	7,12	7,27	7,31
Плотность при 1150°, г/см³	6,89	6,80	6,90	6,85	6,90	6,89	7,04	7,04	6,85	6,80	6,89	6,80	6,90	6,89	7,04	7,04
Плотность при температуре литья, г/см³	6,90		6,94		Н.о.		6,92		6,89		6,89		Н.о.		6,92	
Температура литья, °С	1150		1150		Н.о.		1250		1150		1155		Н.о.		1250	
Химический состав, %:																
Общий углерод	3,69	3,63	3,67	3,76	3,36	3,36	3,10	3,10	3,39	3,60	3,27	3,27	3,71	3,71	3,08	3,08
Графит	3,53	3,42	3,26	3,35	2,97	2,99	2,31	2,27	3,20	3,40	2,88	2,90	2,99	2,96	2,18	2,23
Кремний	2,87		2,10		2,08		1,69		2,86		2,87		2,11		1,63	
Фосфор	0,68		0,46		0,44		0,35		0,67		0,59		0,46		0,35	
Марганец	0,59		0,54		0,50		0,48		0,58		0,52		0,50		0,44	
Сера	0,03		0,05		0,05		0,04		0,03		0,03		0,05		0,04	

1 „Н. о.“ обозначает „не определялась“.

же несколько расширяются. Зегер и Аш предполагают, что это расширение зависит от выделения газов.

При конструировании отливок с этим явлением необходимо считаться. В том случае, когда в деталях смыкаются различные между собой по толщине стенки, в отливке легко могут возникнуть напряжения вследствие разницы в скорости охлаждения разных стенок и, следовательно, неодинаковой их усадки. Если добавить к этому еще и усиленное образование графита в толстых стенках, то легко понять, что некоторые конструкции предъявляют к литейщику особо жесткие требования в отношении мер по предохранению отливок от трещин.

Удельный вес

Удельный вес при разных температурах приводится в табл. 12 в виде значений плотности, выраженной в г/см³.

Коэффициент линейного расширения

В пределах от 1070° до температуры помещения коэффициент линейного расширения может быть определен по табл. 12 путем деления линейной усадки, начиная от 1070°, на 105 000. Как видно, он колеблется в пределах от 0,0000092 до 0,0000169 на 1°. В среднем можно принимать 0,000010. Дриссен (Driessen) дает следующую зависимость между содержанием углерода и коэффициентом линейного расширения в отожженных образцах малокремнистых чугунов (0,1% Si) (табл. 13).

Таблица 13

Коэффициент расширения при	Содержание углерода, %		
	2,24	3,66	3,80
100°	0,0000096	0,0000086	0,0000087
200°	0,0000096	0,0000088	0,0000085

Поверхностное натяжение

Драт и Зауэрвальд [Draht, Sauerwald, 15] определили поверхностное натяжение жидкого чугуна, содержащего 3,22% C, 2,76% Si, 0,49% P, 0,56% Mn и 0,13% S, как указано в табл. 14.

Таблица 14

Температура °C	Удельный вес	Поверхностное натяжение в дин/см
1267	6,81	936
1277	6,80	938
1310	6,75	917
1318	6,74	914

Для золота поверхностное натяжение равно 1018 дин/см² при 1120°, а для меди 1178 дин/см² при 1150°. Состав атмосферы автором не указывается, тем не менее она оказывает очень большое влияние, так как образующаяся на металле окисная пленка сильно затрудняет отливаемость.

Теплопроводность

Дональдсон [Donaldson, 16, 17] приводит величины теплопроводности чугунов, которые в общем можно считать довольно типичными (табл. 15).

Таблица 15

Теплопроводность чугунов

Элементы	Обозначения чугунов												
	S1a)	S6	S8	S9	M3	M4	C:1	C:2	Ni	V	W	IM ⁵⁾	IM ⁶⁾
Общий углерод, % . .	3,35	3,08	3,16	3,25	3,25	3,32	3,19	3,17	3,16	3,19	3,02	3,77	3,49
Связанный углерод, %	0,91	0,79	0,68	0,60	0,74	0,77	0,70	0,93	0,67	0,70	0,78	0,82	0,77
Графит, % .	2,44	2,29	2,48	2,65	2,51	2,55	2,49	2,24	2,50	2,49	2,24	2,95	2,72
Кремний, %	0,65	1,24	1,48	1,91	1,56	1,52	1,42	0,40	1,56	1,45	1,89	1,81	2,07
Сера, % . .	0,12	0,08	0,05	0,07	0,03	0,01	0,05	0,04	0,10	0,08	0,06	0,10	0,04
Фосфор, %	0,17	0,36	0,70	0,81	0,69	0,71	0,70	0,69	0,67	0,69	0,68	0,04	0,04
Марганец, %	0,85	0,94	0,97	0,97	1,87	2,43	0,96	0,97	0,94	0,99	0,76	0,43	0,74
Легирующие элементы, %	—	—	—	—	—	—	0,20	0,39	0,75	0,12	0,48	—	—
Теплопроводность, кал/см.сек													
При 100° .	0,135	0,127	0,122	0,111	0,119	0,117	0,127	0,131	0,108	0,122	0,118	0,094	0,112
„ 200° .	0,128	0,122	0,117	0,108	0,114	0,112	0,122	0,126	0,106	0,117	0,114	0,092	0,108
„ 300° .	0,122	0,116	0,113	0,105	0,109	0,106	0,116	0,120	0,104	0,112	0,109	0,089	0,100
„ 400° .	0,114	0,109	0,107	0,108	0,104	0,101	0,111	0,115	0,101	0,107	0,104	0,087	0,100
а) Перлитовый чугун, отлитый в подогретую песчаную форму. б) Изложницы.													

По Дональдсону:

1. Теплопроводность серого чугуна колеблется в пределах от 0,110 до 0,137 кал/см. сек и по мере повышения температуры уменьшается.

2. Величина теплопроводности зависит не только от состава чугуна, но и от его структуры, хотя и в гораздо меньшей степени.

3. Кремний значительно уменьшает теплопроводность. Никель влияет в том же направлении так же, как марганец и ванадий, хотя последние действуют слабее. Хром и вольфрам способствуют увеличению теплопроводности.

4. Свободный феррит, повидимому, проводит тепло гораздо лучше, чем эвтектоидный перлит.

5. После термической обработки при 550° (отжиг) теплопроводность сначала увеличивается вследствие распада перлита на феррит и графит, а затем несколько уменьшается вследствие окисления феррита на границах графитовых включений.

Влияние отжига на теплопроводность чугуна иллюстрирует табл. 16.

Таблица 16

Влияние отжига при 550° на теплопроводность чугуна С8

Термическая обработка	Связанный углерод %	Теплопроводность, кал/см.сек при			
		100°	200°	300°	400°
В литом состоянии	0,68	0,122	0,117	0,119	0,107
После отжига в теч. 40 час.	0,12	0,136	0,128	0,122	0,115
" " " 80 "	0,11	0,134	0,127	0,122	0,116
" " " 120 "	0,09	0,134	0,126	0,120	0,114
" " " 160 "	0,12	0,130	0,124	0,118	0,113
" " " 200 "	0,12	0,132	0,124	0,117	0,112

Электросопротивление

По данным Пэртриджа [Partridge, 18] сопротивление чугунов прохождению электрического тока выражается следующими цифрами:

Таблица 17а

Чугун	Химический состав, %				Удельное сопротивление	
	общий углерод	графит	кремний	марганец	$\mu\Omega/\text{см}^2$	
					в литом состоянии	в отожженном состоянии
56	3,66	2,00	1,33	0,02	78	—
11	3,06	1,71	2,54	0,02	86	75
12	2,97	1,72	2,87	0,03	90	79
13	2,97	1,80	3,41	0,03	108	99
14	2,76	1,88	4,76	0,05	188	131
15	2,61	2,52	6,04	0,09	192	191
16	2,40	2,30	7,38	0,10	218	214

При содержании марганца в количестве до 2,66% сопротивление чугуна несколько возрастает, точно так же оно увеличивается с 50 единиц при 0,87% Al до 95 при 4,09% Al. В присутствии кобальта сопротивление падает с 83 при 1,86% до 34 при 23,3% Co.

Ниже приводятся данные, характеризующие влияние никеля.

Содержание никеля, % .	0,71	2,81	5,40	8,86	11,51	14,50	16,45	14,83	16,48	18,83
Удельное сопротивление, $\mu\Omega/\text{см}^3$	44	48	81	110	115	122	114	119	127	134

Магнитные свойства

По Гатфильду [Hatfield, 19] магнитные свойства чугуна подобно электросопротивлению могут колебаться в очень широких пределах, начиная от малой проницаемости и большой коэрцитивной силы в чугунах, пригодных для изготовления постоянных магнитов, и кончая большой проницаемостью, малой коэрцитивной силой и малыми потерями на гистерезис в чугунах, применяемых в электромашиностроении. Пэртридж [18] произвел сравнительное исследование магнитных свойств чугунов (табл. 17 и 18).

Таблица 176

Гистерезис (по Пэртриджу)

Показатели	№ 11		№ 12		№ 13		№ 14		№ 15		
	литой	отожженный	литой	отожженный	литой	отожженный	литой	отожженный	литой	литой	отожженный
Пределы индукции . .	10 000	9 000	10 000	9 000	10 000	9 000	10 000	9 000	8 000	4 500	8 000
Коэрцитивная сила .	12,7	4,6	13,1	4,4	12,0	4,4	9,8	3,1	2,2	1,7	2,1
Потери на гистерезис $W/\text{кг}$	44,1	—	44,5	—	39,7	—	32,0	—	5,9	3,5	—

Таблица 18

Нормальная индукция (по Пэртриджу)

Показатели	№ 11		№ 12		№ 13		№ 14		№ 15	№ 16	
	литой	отожженный	литой	отожженный	литой	отожженный	литой	отожженный	литой	отожженный	литой
B_{max} (плотность магнитного потока) . . .	10 190	10 980	10 100	10 850	9 845	10 350	9 455	9 950	9 200	9 125	8 935
H_{max} (сила магнитного поля) . . .	99,8	100	100,1	100	100,2	100	100,1	100	99,7	100	97,3
μ_{max} (проницаемость) . . .	230	680	218	667	213	758	193	795	1 021	1 020	383
H для μ_{max}	16,4	5,0	16,9	5,0	15,2	4,0	20,5	2,6	2,3	1,8	5,9

Пэтртридж приходит к следующим выводам.

1. Наибольшие значения магнитной индукции и проницаемости получаются в отожженных чугунах.

2. Углерод оказывает очень заметное влияние на магнитные свойства. Зернистый графит предопределяет высокую индукцию в противоположность хлопьевидным включениям графита, обуславливающим низкую индукцию. Основными магнитными свойствами чугуна с ферритовой основой нужно считать малые потери на гистерезис и большую проницаемость. В чугунах на перлитовой основе проницаемость сравнительно невысока, потери же на гистерезис значительны.

3. Графит не влияет на потери на гистерезис, но препятствует достижению очень больших значений индукции вследствие отсутствия магнитной непрерывности в структуре. Это нарушение непрерывности служит причиной образования небольших размагничивающих сил внутри образца.

4. Фосфор, повидимому, заметного влияния на проницаемость или на индукцию не оказывает.

5. Присадка никеля вызывает настолько сильное уменьшение магнитной проницаемости чугуна, что в присутствии около 15% Ni он становится практически немагнитным. Ниже (табл. 19) приводятся результаты испытания магнитных свойств после присадки никеля к малокремнистому чугуну (0,32—0,16% Si).

Таблица 19

Показатели	Содержание никеля, %									
	0,71	2,81	5,40	8,86	11,51	14,50	16,45	14,83	16,48	18,82
B_{max} ($H = 120$)	8 900	10 320	5 110	900	440	350	147	164	145	157
Проницаемость (максимальная)	193,0	165,0	55,0	7,5	3,2	3,0	1,4	1,6	1,8	1,4
Общий углерод, % . . .	3,66	3,60	3,52	3,46	3,18	3,16	3,02	3,16	2,82	2,93
Графит, % . .	0,52	1,56	1,78	2,02	1,99	1,98	2,07	2,04	1,83	2,05

6. Присадка кобальта усиливает индукцию, остаточный магнетизм и проницаемость. Усиление индукции зависит от очень мелкого графита в этих чугунах. Кобальт увеличивает также плотность, но на коэрцитивную силу и на потери на гистерезис почти никакого влияния не оказывает. Посредством отжига можно повысить максимум проницаемости и снизить потери на гистерезис, коэрцитивную силу и остаточный магнетизм.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Сопротивление разрыву

В основу практической классификации чугунов в США принято сопротивление разрыву. Проектом спецификации A48-32 T¹

¹ „Proceedings ASTM“ v. 32, part. 1, p.625, 1932; также 1932, Book of ASTM, Tentative Standard, p. 179.

Американского общества испытания материалов предусматриваются нижеследующие семь классов серого чугуна:

№ класса	Сопротивление разрыву, кг/мм^2 (минимальное)
20	14
25	17,5
30	21
35	24,5
40	28
50	35
60	42

Так как в предыдущих разделах уже рассматривалось влияние на структуру массы и термических условий, то в дальнейшем сравниваются между собой отливки простейшего вида с примерно одинаковой скоростью охлаждения.

Коэффициент сопротивления изгибу

Термин «коэффициент сопротивления изгибу» является математическим условным выражением, принятым для выражения сопротивления изгибу маловязких материалов, вообще не подчиняющихся закону Гука, согласно которому «отношение напряжения к деформации есть величина постоянная». Общая формула для коэффициента сопротивления изгибу при одной сосредоточенной нагрузке посередине между опорами имеет следующий вид:

$$MR = \frac{Plc}{4I}$$

где

- MR — коэффициент сопротивления изгибу, кг/мм^2 ,
 P — разрушающая нагрузка, кг ,
 l — расстояние между опорами, мм ,
 c — расстояние крайнего колodka от нейтральной оси,
 I — момент инерции поперечного сечения по отношению к нейтральному слою.

Численные значения выражения $\frac{lc}{4I}$ для образцов, принятых спецификацией A48-32 Т Американского общества испытания материалов, равны соответственно:

Диаметр образцов мм	Расстояние между опорами мм	$\frac{lc}{4I}$
22,225 (0,875")	304,8 (12")	45,61
30,48 (1,20 ")	457,2 (18")	26,53
50,8 (2,00 ")	609,6 (24")	7,64

Таким образом остается только умножить величину разрушающей нагрузки на соответственное вышеуказанное число, чтобы получить коэффициент сопротивления изгибу.

Соотношение между коэффициентами сопротивления изгибу и разрыву (фиг. 21, 23)

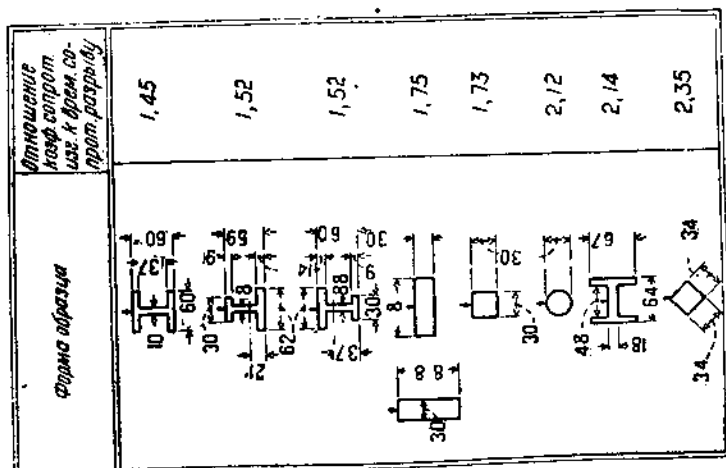
Сопротив- ление раз- рыву кг/м.м^2	Число испытаний	Средняя величина отношения	Наименьшая ве- личина отноше- ния	Наибольшая ве- личина отноше- ния	Сопротив- ление раз- рыву кг/м.м^2	Число испытаний	Средняя величина отношения	Наименьшая ве- личина отноше- ния	Наибольшая ве- личина отноше- ния
От 10,57 до 14	8 5 ¹ 5	2,27 2,37 2,41	1,77 2,08 2,09	3,11 2,55 2,87	От 28,07 до 31,5	5 3 ¹ 2	1,86 2,06 2,02	1,67 2,03 2,01	2,14 2,10 2,02
От 14,07 до 17,5	22 2 3 3 ¹	1,89 2,16 2,26 2,07	1,52 2,03 1,99 1,65	2,58 2,28 2,40 2,35		14 7 2 2 ¹	1,55 1,49 1,66 1,99	1,35 1,32 1,47 1,96	1,72 1,68 1,85 2,02
От 17,57 до 21	3 11 4 1	2,28 1,67 1,80 2,07	2,15 1,60 1,57 —	2,37 1,76 1,94 —		2 ¹ 7 4 3	2,16 1,38 1,38 1,47	2,12 1,26 1,35 1,40	2,19 1,56 1,42 1,59
От 21,07 до 24,5	2 ¹ 2 19	2,20 2,24 1,88	2,14 2,15 1,48	2,26 2,32 2,11		1 ¹ 1 4	1,91 2,01 1,29	— — 1,21	— — 1,50
	2 2 7 ¹	1,80 2,10 2,08	1,66 2,02 1,98	1,93 2,17 2,22	От 35,07 до 38,5	2 1 ¹ 1	1,29 1,81 2,03	1,21 — —	1,36 — —
	7 10	2,27 1,72	2,11 1,38	2,54 2,11		1 1 ¹	1,13 2,01	— —	— —
От 24,57 до 28	6	1,67	1,54	1,91		1	2,06	—	—

¹ Образцы обрабатывались.

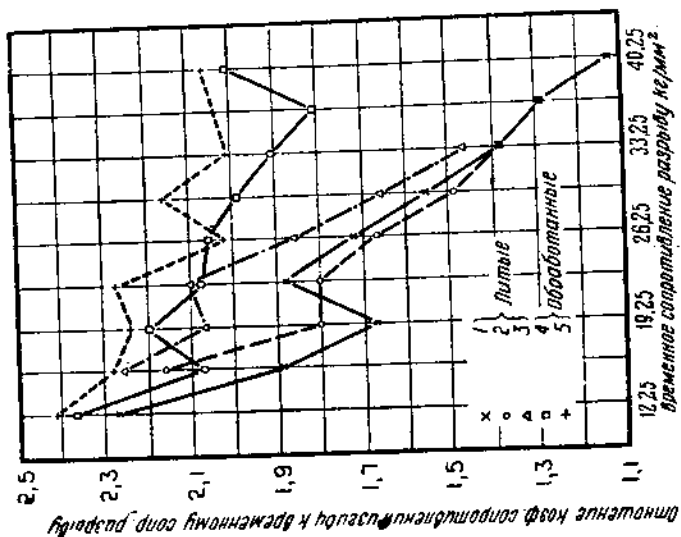
Строго говоря, коэффициент сопротивления изгибу не является свойством материала, как таковым, но зависит от формы образца (Бах, фиг. 21), от условий нагрузки, от характера поверхности образца с литейной коркой или обработанной, причем образцы на растяжение принимаются обработанными, и от степени отклонения от закона Гука.

Зависимость коэффициента сопротивления изгибу от сопротивления разрыву заслуживает более подробного рассмотрения. Вообще говоря, все условия, способствующие уменьшению сопротивления разрыву, как например, большое содержание графита или крупнозернистое строение металлической основы чугуна, не говоря о других условиях второстепенного значения, одновременно служат причиной сильного отклонения материала от следования закону Гука. Поэтому чем больше сопротивление разрыву, тем ближе к нему и коэффициент сопротивления изгибу, и наоборот.

При расчете чугунных конструкций, имеющих форму балки, как например, в весах, или форму кольца, как например, в водопроводных и дренажных трубах, находящихся под давлением



Фиг. 21. Зависимость коэффициента сопротивления изгибу от сечения (Васи)



Фиг. 22. Зависимость между временным сопротивлением разрыву и величиной отношения коэффициента сопротивления изгибу к временному сопротивлению разрыву для пяти чугунов

грунта, нужно учитывать и коэффициент сопротивления материала изгибу, задаваясь возможно большей величиной соотношения между сопротивлением изгибу и сопротивлением разрыву. Так например, для водопроводных труб, рассчитанных на внутреннее давление, может быть принято сопротивление разрыву $10,5 \text{ кг/мм}^2$ при коэффициенте сопротивления изгибу в 28 кг/мм^2 против давления грунта и наземного транспорта.

Чем мягче и пластичнее чугун, тем меньше влияния оказывают пороки литой поверхности необработанного испытуемого образца. С другой стороны, это явление зависит от того, что в мягких образцах сердцевина вследствие более медленного охлаждения вообще менее прочна по сравнению с наружным слоем. Для высококачественных чугунов условия будут несколько иными, и единственным фактором, влияющим на уменьшение сопротивления разрыву в таких чугунах остается усадка.

В табл. 21 приводятся соответствующие данные для образца с диаметром в $55,88 \text{ мм}$ ($2,20''$). Как видно, величины отношений и характер их изменения очень сходны с данными табл. 17. Та же тенденция наблюдается и в данных Коммера [Kommers, 24], для соотношения между коэффициентом сопротивления изгибу образца с диаметром в $31,75 \text{ мм}$ ($1,25''$) при длине в $304,8 \text{ мм}$ ($12''$) и временным сопротивлением разрыву образца с диаметром в $15,24 \text{ мм}$ ($0,6''$), как показано в табл. 22.

Таблица 21

Временное сопротивление разрыву кг/мм^2	Число испытаний	Средняя величина отношения, χ	Наименьшая величина отношения	Наибольшая величина отношения	Временное сопротивление разрыву кг/мм^2	Число испытаний	Средняя величина отношения, χ	Наименьшая величина отношения	Наибольшая величина отношения
10	2	2,45	2,42	2,47	23	6	1,96	1,82	2,13
13	3	2,42	2,10	2,84	26	3	1,85	1,81	1,91
16	5	2,23	2,01	2,64	28	3	1,67	1,60	1,76
20	2	2,09	2,03	2,15	33	1	1,41	—	—

Таблица 22

Соотношение между коэффициентом сопротивления изгибу и временным сопротивлением разрыву

Временное сопротивление разрыву в среднем кг/мм^2	Число испытаний	Средняя величина отношения	Наименьшая величина отношения	Наибольшая величина отношения
17	1	2,17	—	—
22	4	1,94	1,80	2,04
26	3	1,89	1,64	2,10
34	2	1,67	1,50	1,83

Сопротивление сжатию

Хотя сопротивление сжатию является одним из самых важных свойств чугуна, однако данных о нем имеется мало по сравнению с данными испытаний чугуна на разрыв и на изгиб. Может быть, самой лучшей сводкой таких данных нужно считать результаты сравнительных испытаний, приведенные в табл. 23, которые показывают, что величина соотношения между сопротивлением сжатию и сопротивлением разрыву изменяется в направлении, обратном сопротивлению разрыву, т. е. подобно коэффициенту сопротивления изгибу.

Таблица 23

Соотношение между сопротивлением сжатию и сопротивлением разрыву¹

Размеры образца при сжатии $30,5 \times 61$ мм, диаметр образца при разрыве 20,3 мм

Временное сопротивление разрыву $кг/мм^2$	Число испытаний	Средняя величина отношения	Наименьшая величина отношения	Наибольшая величина отношения	Число испытаний	Средняя величина отношения	Среднее квадратичное отклонение	Наименьшая величина отношения	Наибольшая величина отношения
	ASTM [2]					Kommers [24]			
10,57 — 14	4	4,08	3,59	4,35	—	—	—	—	—
14,07 — 17,5	4	4,02	3,67	4,50	1	3,42	—	—	—
17,57 — 21	2	3,68	3,67	3,69	—	—	—	—	—
21,07 — 24,5	7	3,61	3,37	4,21	4	3,83	0,14	3,64	4,03
24,57 — 28	3	3,39	3,23	3,49	3	3,43	0,25	3,10	3,71
28,07 — 31,5	2	2,99	2,85	3,13	—	—	—	—	—
31,57 — 35	1	3,31	—	—	1	3,25	—	—	—
35,07 — 38,5	1	3,08	—	—	1	3,07	—	—	—
38,57 — 42	1	2,45	—	—	—	—	—	—	—

¹ Из отчета ASTM [2].

В табл. 24 приведены данные Пивоварского [25].

Таблица 24

Соотношение между сопротивлением сжатию и временным сопротивлением разрыву
(по Пивоварскому)

Временное сопротивление разрыву $кг/мм^2$	$\frac{R_{сж}}{R_{разр}}$
21	4,28
21,7	4,31
23,87	3,77
29,05	3,40

Не зная методики его испытания, трудно сказать что-нибудь определенное относительно абсолютной величины соотношений, несколько превышающих данные табл. 23, тем не менее характер изменения отношений в зависимости от сопротивления разрыву остается тем же.

Сопротивление срезу

Испытание чугуна на срез, широко применяемое во Франции, представляет превосходный способ для определения местной (локальной) прочности отливки и, как таковое, особенно пригодно при исследовании литья. Соотношение между сопротивлением срезу и разрыву совершенно подобно отношению между коэффициентом сопротивления изгибу и сопротивлением сжатию.

Результаты испытаний на срез по отчетам ASTM близки к ранее опубликованным данным Болтона (Bolton) и приведены в табл. 25.

Большое содержание фосфора или свободного цементита заметно влияет на величину отношения между сопротивлением срезу и временным сопротивлением разрыву.

Таблица 25

Соотношение между сопротивлением срезу и временным сопротивлением разрыву (диаметр образца 12,7 мм)

Временное сопротивление разрыву кг/мм^2	ASTM [2]					По Bolton [26]
	Число испытаний	Средняя величина отношения	Среднее квадратичное отклонение	Наименьшая величина отношения	Наибольшая величина отношения	Средняя величина отношения
10,57 — 14,0	5	1,64	0,21	1,38	2,03	1,57
14,07 — 17,5	3	1,38	0,07	1,29	1,47	1,44
17,57 — 21,0	2	1,38	—	1,33	1,42	1,36
21,07 — 24,5	7	1,40	0,06	1,34	1,52	1,31
24,57 — 28,0	3	1,32	0,07	1,24	1,37	1,23
28,07 — 31,5	2	1,15	—	1,13	1,16	1,18
31,57 — 35,0	1	1,29	—	—	—	—
35,07 — 38,5	1	1,19	—	—	—	—
38,57 — 42,0	1	1,01	—	—	—	—

Кручение

В табл. 26 приводятся величины соотношений между сопротивлением кручению и сопротивлением разрыву по Баху [Bach, 27]. Повидимому, форма образца оказывает большое влияние на прочность.

Сопротивление кручению [Bach, 27]

Временное сопротивление разрыву: чугуны А 10,75 кг/мм²
 чугуны В 16,73 " "
 чугуны С 32,40 " "

Образец	Отношение между сопротивлением кручению и временным сопротивлением разрыву		
	А	В	С
Круглый	1,02	—	—
Кольцеобразный полый	0,82	0,86	—
Прямоугольный	—	—	—
отношение основания к высоте	—	—	—
1:1	1,42	1,55	—
1:25	1,60	—	1,42
1:5	1,50	1,59	—
1:9	1,59	—	—
Квадратный полый	1,13	—	—
Трапециoidalный	—	—	1,55
Треугольный равносторонний	—	—	1,52
Треугольный с острым углом	—	—	1,38

Предел усталости

Новейшие исследования показывают, что предел усталости изменяется, повидимому, пропорционально временному сопротивлению разрыву. В табл. 27 приведено несколько значений этой зависимости:

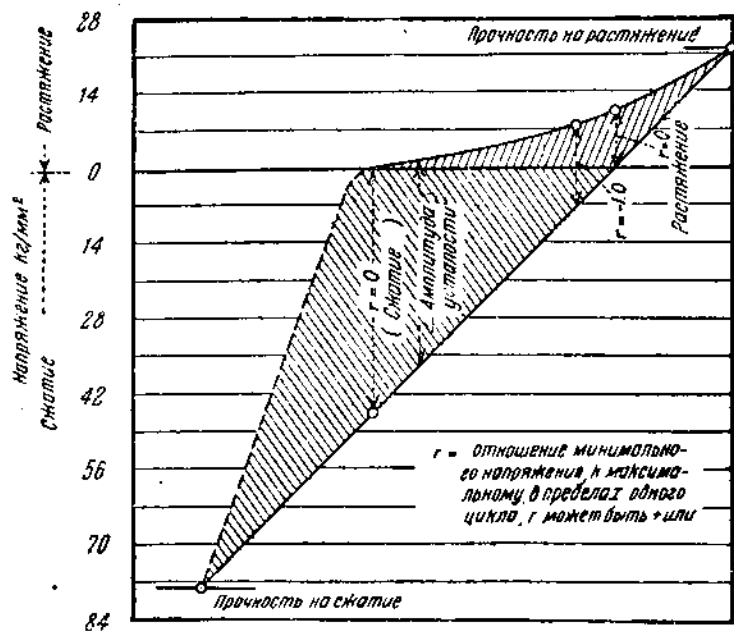
Таблица 27

Показатели	[Thum, Ude, 23]	[Kommers, 2]	ASTM [2]
Число испытаний	14	10	24
Средняя величина отношения предела усталости к пределу временного сопротивления разрыву	0,40	0,49	0,50
Наименьшая величина отношения предела усталости к пределу временного сопротивления разрыву	0,35	0,42	0,43
Наибольшая величина отношения предела усталости к пределу временного сопротивления разрыву	0,45	0,57	0,63

Kommers производил испытание на машинах, тщательно предохранявшихся от вибраций, которые, вероятно, способствуют возрастанию величины отношения предела усталости к пределу временного сопротивления разрыву, хотя частично разница в ре-

зультатах может быть отнесена и на счет небольшой величины образца при испытании на разрыв. Thum и Ude применяли стандартные образцы с диаметром в 20,3 мм. Образцы для испытания на усталость имели у Kommers $d=8,38$ мм и 9,40 мм у Thum и Ude.

Мур [Moore, 28] показал, что надрезы и запилы в образцах мягкого чугуна влияют в гораздо меньшей степени, чем этого можно было бы ожидать. Так например, предел усталости в образце чугуна после просверливания радиальной дыры уменьшился всего лишь на 13% против ожидавшегося уменьшения, на 67%.



4 ил. 23. Изменения предела усталости чугуна в зависимости от изменения пределов напряжений (Г. В. Kommers)

В двух других образцах с закругленными выточками действительное уменьшение предела усталости выразилось соответственно в 0 и в 8%, хотя по расчету уменьшение должно быть 74%.

Kommers испытывал мягкий чугун с квадратным запилом и нашел, что предел усталости не только не уменьшился, а наоборот, увеличился на 35 кг/мм^2 . Kommers приводит интересные данные о влиянии переменных усилий¹.

¹ Г. В. Kommers, Усталость литейного чугуна „Proceedings ASTM“ 29, Part II, стр. 103—107, 1929. На фиг. 23 приведены результаты испытаний на усталость, полученные при различных сочетаниях растяжения и сжатия в одном и том же цикле приложения напряжений. Когда напряжение было исключительно сжимающим и изменялось от нуля до наибольшего значения ($r=0$) амплитуда цикла достигала 45,5 кг/мм^2 , что соответствовало пределу усталости при сжатии. Как только в цикл вводили небольшое на-

Свойство усталости имеет большое значение при проектировании цилиндрических шестерен. В табл. 28 (проект рекомендуемых норм Американского общества заводов зубчатых колес) приведены относительные величины предела поверхностной усталости для стальных и чугунных зубчатых колес.

Таблица 28

Относительные значения предела усталости

Материал шестерни	Твердость по Бринеллю	Материал колеса	Твердость по Ринеллю	Предел усталости $г/мм^2$
Сталь	150	Сталь	150	35
"	200	"	200	49
"	250	"	250	63
"	150	Чугун	—	35
"	200	"	—	49
"	250	"	—	63
Чугун	—	"	—	63

Упругость, пластичность, жесткость

Термин «модуль упругости» в применении к чугуну, обозначает, вообще говоря, величину его относительной жесткости при данных условиях нагрузки. Он может быть определен непосредственно при испытаниях на разрыв или на сжатие путем измерения изменения длины на единицу нагрузки.

Для каждой данной нагрузки модуль упругости определяется по формуле:

$$E = \frac{Pl}{eA}$$

где

E — модуль упругости,

P — нагрузка в кг,

l — измеряемая длина в мм,

приращение растяжения, амплитуда резко падала. Так например, при растягивающем напряжении около $4,5 \text{ кг/мм}^2$ амплитуда цикла составляла только $26,88 \text{ кг/мм}^2$. При целиком противоположных напряжениях, другими словами при равенстве напряжений сжатия и растяжения ($r = -1$), амплитуда снизилась до $14,7 \text{ кг/мм}^2$, причем предел усталости оказался равным $7,35 \text{ кг/мм}^2$. Наконец, когда напряжение было полностью растягивающим и изменялось в пределах от нуля до наибольшего значения ($r = 0$), амплитуда была наименьшей из всех и равнялась всего лишь $10,85 \text{ кг/мм}^2$, что соответствует пределу усталости при растяжении.

Таким образом амплитуда цикла в описанных испытаниях колебалась от $45,5 \text{ кг/мм}^2$ при сжатии до $10,85 \text{ кг/мм}^2$ при растяжении. Из этого с очевидностью следует, что для разрушения чугуна от усталости наиболее опасным являются растягивающие усилия. Если обозначить предел усталости при целиком меняющемся напряжении через S_{-1} , отношение наименьшего напряжения к наибольшему через r и наибольшую величину напряжения любого цикла через $S_{\max}$, то для той части диаграммы (фиг. 23), для

e — изменение измеряемой длины в мм при нагрузке P ,
 A — площадь поперечного сечения образца в мм².

Определяемый по этой формуле модуль не является истинным для данной нагрузки, а характеризует собой относительную степень жесткости. Относительный модуль упругости, определяемый при испытании на изгиб, подсчитывается так же просто, как и при определении его при испытании на разрыв или на сжатие.

В случае нагрузки посередине формула для подсчета модуля упругости имеет следующий вид:

$$E = \frac{Pl^3}{48ID}$$

где E — модуль упругости в кг/мм²,

P — нагрузка в кг,

l — расстояние между опорами в мм,

I — момент инерции,

D — прогиб (в мм) под действием нагрузки P .

Момент инерции равен

$$\frac{\pi d^4}{64} \text{ для круглого сечения}$$

Фиг. 24. Верхняя часть диаграммы фиг. 23
 (I. В. Kommers)

или $\frac{bd^3}{12}$ для прямоугольного, где b — ширина и d — толщина или диаметр.

Для любого из стандартных образцов можно вычислить заранее величину $\frac{l^3}{48J}$ и в дальнейшем принимать ее за постоянную.

Таким образом формула для определения модуля упругости для каждого из трех стандартных образцов может быть написана в упрощенном виде (см. табл. 29).

которой растягивающее напряжение является наибольшим по числовому значению, можно написать уравнение:

$$S_{\max} = \frac{38 - 1}{2 - r} \quad (1)$$

Для той же части этой диаграммы, для которой наибольшим по числовому значению является сжимающее напряжение, уравнение будет:

$$S_{\max} = \frac{6S - 1}{1 - 5r} \quad (2)$$

Уравнение (2) относится к части диаграммы, показанной на фиг. 24, которая отличается от этой части на фиг. 23 только тем, что верхняя кривая линия фиг. 23, соответствующая предельным величинам растягивающих напряжений на фиг. 24 выпрямлена. Если принять $S-1$ равным 7,35 кг/мм², то при $r=0$ предел усталости практически равен $6S-1$. Для r расчетное значение $S_{\max}$ получается равным 22,05 кг/мм², тогда как непосредственное испытание дает 22,4 кг/мм².

Нужно отметить, что как в уравнении (1), так и в уравнении (2) r отрицательно в тех случаях, когда цикл состоит частью из сжимающих и частью из растягивающих напряжений.

Таблица 29

Диаметр образца, мм	Расстояние между опорами, мм	Модуль упругости
22,225 (0,875")	304,8 (12")	$E = 1251 \frac{P}{D}$
30,48 (1,20")	457,2 (18")	$E = 1194 \frac{P}{D}$
50,8 (2,00")	609,6 (24")	$E = 367 \frac{P}{D}$

Поскольку величина модуля в сильной степени зависит от размеров образца, необходимо для пользования этими простыми формулами предварительно пересчитать нагрузку и прогиб на стандартные образцы. Величину прогиба можно пересчитать на эквивалентный прогиб стандартного образца по формуле:

$$D = D_0 \frac{d_0}{d_s}$$

где D — пересчитанный прогиб при пересчитанной нагрузке,
 D_0 — диаметр стандартного образца,
 d_0 — измеренный прогиб при действительной нагрузке,
 d_s — диаметр испытуемого образца.

Для определения относительного модуля упругости при промежуточных нагрузках в образцах, имеющих большие или меньшие размеры, отсчитывают прогиб при требуемой нагрузке (пересчитывая таковую по таблице ASTM) и пересчитывают величину прогиба по вышеприведенной формуле.

Модуль жесткости выражается отношением напряжения к деформации при испытаниях на срез и на кручение. Этот модуль определяется очень редко, но для нормальных рабочих значений модуля упругости E модуль жесткости можно принять равным $0,4E$, если E определялось примерно при том же соотношении рабочего и разрушающего напряжений. На величину относительного модуля упругости, определяемого при испытании на изгиб, гораздо большее влияние оказывает величина расстояния между опорами, чем форма образца. При испытании на изгиб 39 групп образцов, по 3 образца в каждой группе, были найдены следующие величины соотношений модулей упругости между образцами, длиной в 609,6 мм (24") с сечением в $25,4 \times 50,3$ мм (1×2 ") и образцами длиной в 457,2 мм (18") при диаметре в 30,48 мм (1,20").

Средняя величина отношения между образцами 0,99
 Наименьшая величина отношения 0,88
 Наибольшая величина отношения 1,16

Отношения расстояния между опорами к величине момента инерции для каждого из этих двух образцов довольно точно совпадают друг с другом (144 и 120).

В табл. 30 приводятся результаты подсчета модуля упругости при нагрузке 25% от разрушающего напряжения.

Таблица 30

Соотношения между модулями упругости при сжатии, разрыве и изгибе (число испытаний 25)

Показатель	Отношение модуля упругости к модулю упругости при изгибе	
	при сжатии	при разрыве
Средняя величина отношения при 0,25 разрушающего напряжения	0,88	0,89
Наименьшая величина отношения	0,69	0,75
Наибольшая величина отношения	1,03	0,97

Величина относительного модуля упругости, вообще говоря, увеличивается по мере увеличения сопротивления разрыву. Ниже приводятся данные, подтверждающие эту зависимость по отчету ASTM [2].

Таблица 31

Сопротивление разрыву кг/мм ²	Число испытаний	Среднее значение модуля упругости кг/мм ²	Модуль упругости кг/мм ²	
			наименьший	наибольший
10,57 — 14,0	4	8 120	7 280	8 960
14,07 — 17,5	4	9 940	9 310	10 220
17,57 — 21,0	2	10 150	10 010	10 220
21,07 — 24,5	7	11 200	9 240	12 180
24,57 — 28,0	3	12 670	11 550	13 930
28,07 — 31,5	2	12 950	12 530	13 370
31,57 — 35,0	1	15 820	—	—
35,07 — 38,5	1	13 370	—	—
38,57 — 42,0	—	13 939	—	—

Модуль определен для нагрузки, равной 0,25 от разрушающей, так как это соответствует наиболее употребительному в инженерной практике коэффициенту надежности. Значения модуля упругости при разрушающей нагрузке колеблются гораздо сильнее, чем при нагрузке, равной 0,25 от разрушающей, и сами по себе гораздо меньше.

Чугун, впервые подвергающийся нагрузке, дает заметную остаточную деформацию. При повторном приложении той же нагрузки деформация увеличивается очень незначительно и после 5—10-кратного повторения нагрузки чугун начинает вести себя, как совершенно упругий материал. После многих сотен повторных нагрузок, не превышающих 80% от разрушающей, в хорошем высококачественном чугуне никаких дальнейших пластических деформаций уже не наблюдается. Если же, однако, материал, ставший упругим при какой-либо нагрузке, подвергнуть действию увеличенной нагрузки, то он снова дает некоторую остаточную деформацию подобно исходному материалу между первым и вторым приложением нагрузки. Образец, подвергавшийся многократному действию определенной нагрузки, дает перегиб на кривой при переходе за этот предел. Точно так же получается добавочная деформация и при повышении температуры.

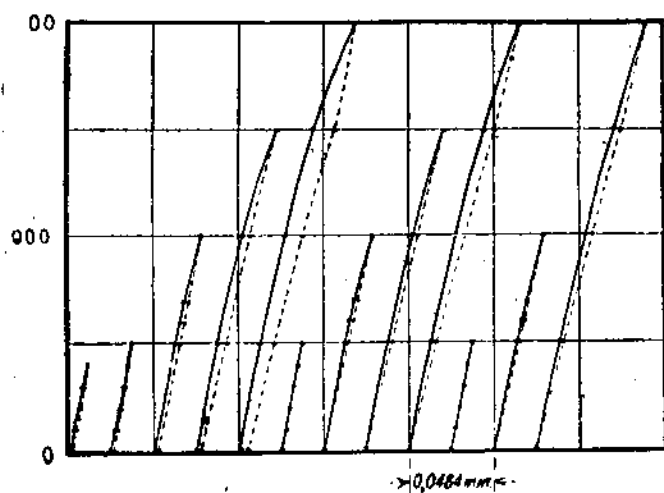
Эта особенность чугуна видна на кривых фиг. 25 и 26 [Sagittiga, 29]. На фиг. 25 приведены кривые для одного и того же образца при 12 последовательных нагрузках при комнатной температуре, а на фиг. 26 — кривые для четырех нагрузок того же образца при повышенных температурах.

Величина остаточных деформаций, вообще говоря, повидимому, обратно пропорциональна прочности и модулю упругости, как это показывает фиг. 27, изображающая зависимость некоторых свойств в пяти группах образцов, испытывавшихся на изгиб. Остаточные деформации были получены при нагрузке, равной 80% от разрушающей, и, следовательно, по своей величине значительно превышают деформацию при меньшей нагрузке, потому что, как доказано, при нагрузке в 80% от разрушающей остаточная деформация более чем в 3 раза превышает деформацию при нагрузке в 25% от разрушающей.

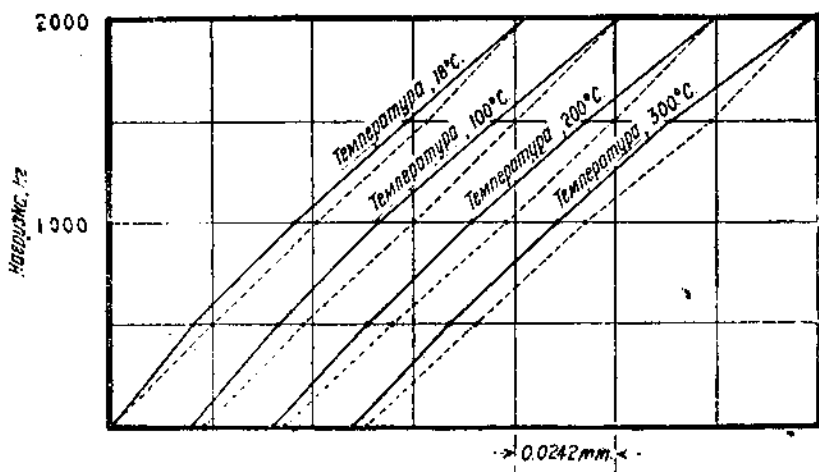
Сопротивление удару

Обыкновенно чугун не применяется в конструкциях, испытывающих удары, тем не менее различные сорта чугунов сильно разнятся между собою в отношении сопротивления ударам, причем некоторые из них могут выдерживать без разрушения довольно сильные ударные напряжения.

Способы испытания. Наиболее употребительны два вида испытаний на удар. Первый и самый распространенный способ испытания вязких материалов состоит в том, что испытуемый образец подвергается ударному действию падающего маятникового копра, причем количество энергии, затраченной копром на разрушение образца и, следовательно, поглощенной последним, измеряется по убыли в энергии маятника. Сюда относятся способы Изода, Шарпи и ударные испытания на разрыв. Второй способ, издавна применявшийся для испытания чугуна, заключается в повторном действии на образец сравнительно слабых ударов. Одна из разновидностей этого способа — способ Крупна—Стантона — состоит в том, что образец подвергается ударам бойка, падающего с небольшой определенной высоты. Число ударов,

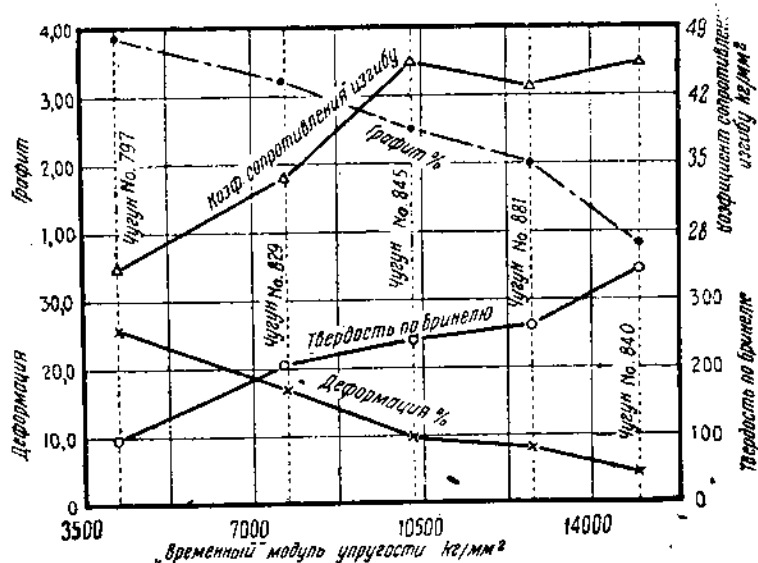


Фиг. 25. Влияние повторных нагрузок на растяжение образца (измеряемая длина 7,6 см; диаметр 1,9 см. (J. Sagimura)



Фиг. 26. Результаты испытаний образцов по фиг. 23 при обыкновенной и при повышенной температурах (измеряемая длина 12,7 см) (J. Sagimura)

после которого образец разрушается, считается мерой сопротивления удару. Применяется также и другой способ, заключающийся в том, что высота падения бойка все время возрастает. Та высота падения, которая вызывает разрушение образца, принимается за меру сопротивления удару, или за ударную прочность.



Фиг. 27. Значения пластической деформации при шести повторных нагрузках до напряжения в 0,75 временного сопротивления в зависимости от модуля упругости с указанием прочности, твердости и содержания графита (Mackenzie)

Влияние способа испытания на результаты. Из рассмотрения условий испытания следует, что один и тот же материал может оказаться хорошим при испытании одним каким-либо способом и слабым при другом способе. Так например, пластическая деформация может обусловить значительное поглощение энергии при испытании на маятниковом копре, но, с другой стороны, она не имеет большого значения при втором способе. Точно так же при испытании по Круппу—Стантону большое значение имеют относительная величина предела усталости и сила удара, в то время как в испытаниях по Изоду или Шарпи влияние этих условий очень невелико.

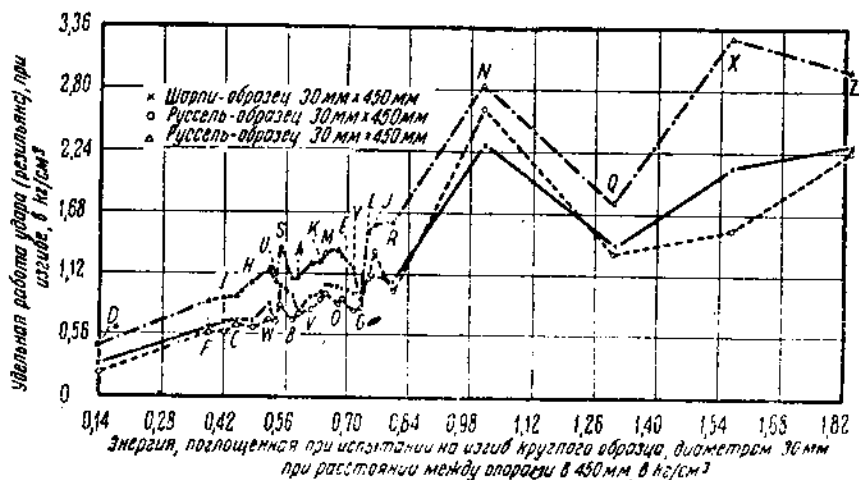
Способ выражения результатов испытаний. В отношении материалов, дающих межкристаллический излом, как при медленном, так и при мгновенном приложении нагрузки, работа, затрачиваемая на разрушение образца (резильянс) при разрыве, сжатии или изгибе может служить довольно точным выражением сопротивления материала удару соответственно при растяжении, сжатии или изгибе. В таком виде она представляет собой «истинное» сопротивление удару. Величина этой работы (резильянса)

может быть также измерена величиной площади диаграммы, ограничиваемой кривой нагрузка — деформация, и выражена приближенно в виде

$$\frac{\text{нагрузка} \times \text{прогиб.}}{2}$$

Так же приближенна работа сопротивления удару для данных условий. Расстояние между опорами, размеры образца, способ приложения нагрузки и пр. могут быть выражены в виде квадрата коэффициента сопротивления изгибу, деленного на модуль упругости.

77

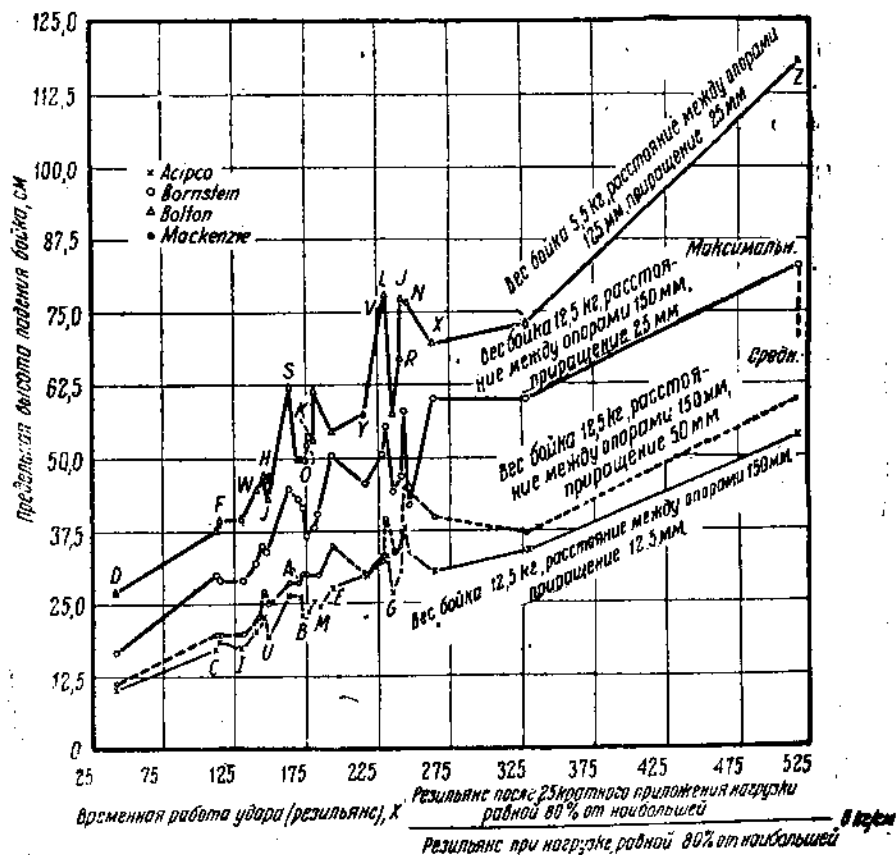


Фиг. 29. Зависимость удельной работы удара при изгибе от сопротивления удару (диаметр образца 30,5 мм)

Испытания на удар и удельная работа удара (резильянс). Результаты сравнительных испытаний на сопротивление удару для различных маятниковых копров показаны на фиг. 28. Для испытания были взяты образцы с диаметром в 30,5 мм (1,2") при расстоянии между опорами в 457,2 мм (18"), за исключением лишь одного случая, когда расстояние между опорами было взято в 203,2 мм (8") с целью выявления возможности испытания образцов меньших размеров. Кривые результатов получились вполне удовлетворительные, за исключением N для мартеновского чугуна и X для аустенитового. Вследствие уменьшения расстояния между опорами до 203 мм, M... N и X оказались далеко за пределами прочих кривых, как и следовало ожидать, так как уменьшенное расстояние между опорами послужило причиной уменьшения модуля упругости. Испытанию подвергались образцы диаметром в 30,5 мм (1,2") без запила, как на приборе Шарпи, так и на приборе Русселя. Образцы с малым поперечным сечением дали очень сомнительные результаты и поэтому не могут быть рекомендованы для испытаний чугуна. Результаты, полученные

при испытании по способу Круппа—Стантона (вес бойка 1,17 кг, высота падения 30,5 мм, диаметр образца 12,7 мм; образец поворачивался после каждого удара на 180°) также наносились на диаграмму, но никакой закономерной связи с удельным сопротивлением удару при этом не было обнаружено, поэтому способ Круппа—Стантона не может быть рекомендован. По той же причине обнаружилась непригодность способа испытания на ударное растяжение.

Результаты испытания с падающим бойком с постепенно увеличивающейся высоты падения его показаны на фиг. 29.



Фиг. 29. Результаты испытания на удар падающим бойком при переменной высоте падения (диаметр образца 30,5 мм)

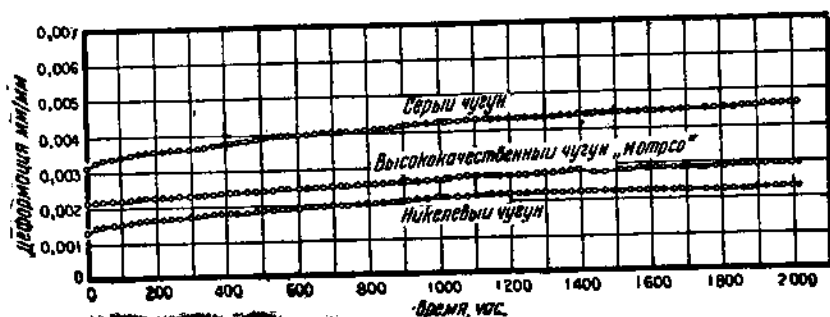
Нижняя шкала построена таким образом, чтобы удельная работа удара (резильянс) после повторных нагрузок оставалась почти равной или несколько ниже исходной разрушающей нагрузки. В настоящее время мы не имеем еще переводных коэффициентов для взаимного перечисления результатов, получаемых на двух различных машинах. Несмотря на это, описанный

способ прост по выполнению и, повидимому, может найти применение в будущем.

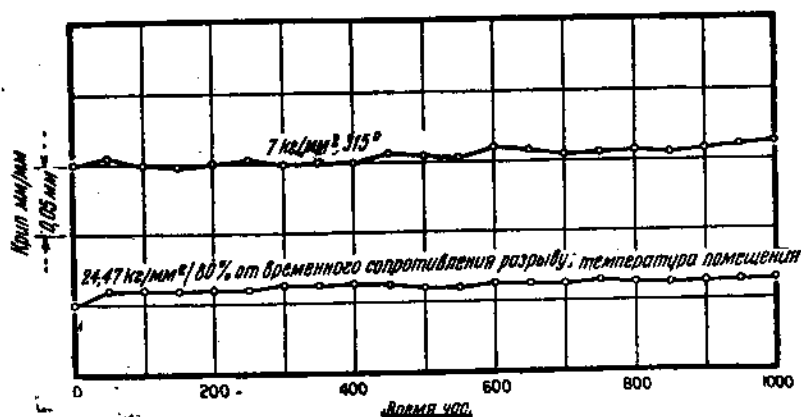
Принято считать, что по мере увеличения содержания фосфора сопротивление чугуна удару уменьшается. В числе образцов, подвергавшихся испытаниям на удар, в опытах ASTM один имел чрезвычайно много фосфора — 2,00%, и образец этот действительно показал очень невысокое сопротивление удару. Между сопротивлением удару и сопротивлением разрыву или изгибу определенной зависимости не имеется. В общем, однако, можно считать, что с увеличением сопротивления разрыву или изгибу, возрастает и сопротивление удару. Точно так же чугуны с более высоким пределом усталости лучше сопротивляются удару.

Крип (ползучесть)

В литературе встречается очень мало данных по вопросу о крипе. Повидимому, наиболее достоверные данные сообщены Алленом и Болтоном [Allen и Bolton, 31, 32] в их работе о жаро-



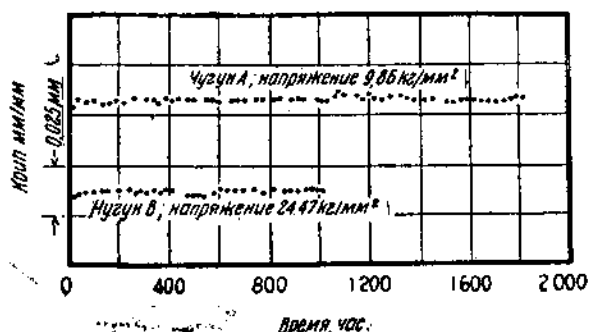
Фиг. 30. Деформация чугунов при 370° в зависимости от продолжительности испытания



Фиг. 31. Зависимость крипа от времени

упорности чугунов (фиг. 30). Данные эти собраны в табл. 32. Результаты испытаний, проведенных Болтоном (фиг. 31) над

обыкновенным углеродистым чугуном с временным сопротивлением разрыву в $31,5 \text{ кг/мм}^2$ при содержании углерода в $2,7\%$, показали почти полное отсутствие крипа в течение 1000 час. под нагрузкой в 7 кг/мм^2 при температуре в 315° . В этих условиях крип составил всего лишь $0,0635 \text{ мм}$ ($0,0025''$). При таком же испытании при комнатной температуре и под нагрузкой в $24,5 \text{ кг/мм}^2$ крип выразился только в $0,127 \text{ мм}$ ($0,005''$), причем практически весь проявился в течение первых двух дней испытания (фиг. 32). На основании этих данных Болтон предполагает, что высокосортные чугуны можно применять с успехом в условиях гораздо более высоких температур, чем это было принято до настоящего времени. Диаграмма (фиг. 32) показывает, что чугуны, имеющие очень небольшую прочность (временное сопротивление разрыву $12,32 \text{ кг/мм}^2$) могут выдержать нагрузку в $9,86 \text{ кг/мм}^2$ (80% от временного сопротивления) бесконечно долго, без заметных следов крипа.



Фиг. 32. Испытания чугуна на крип при 38°

ность (временное сопротивление разрыву $12,32 \text{ кг/мм}^2$) могут выдержать нагрузку в $9,86 \text{ кг/мм}^2$ (80% от временного сопротивления) бесконечно долго, без заметных следов крипа.

Таблица 32

Испытания на крип при 870°

(Battelle Memorial Institute)

Углерод общий %	Углерод— графит, %	Кремний, %	Легиро- вые эле- менты, %	Временное сопротив- ление разр кг/мм^2	Твердость по Бринеллю	Предел усталости, кг/мм^2	Нагрузка, кг/мм^2	Деформ., $\text{мм/ч} \times 10^{-7}$					
								0—150ч.	150—450ч.	450—900ч.	900—1200ч.	1200—2000ч.	2000ч.
3,40	2,70	1,50	Нет	22,05	197	10,15	10,35	12,1	12,1	5,9	3,4	3,0	
2,95	2,10	2,45	Нет	31,5	237	15,75	10,35	5,3	5,3	5,3	3,4	0,0	
3,20	2,60	1,15	Ni—1,50	31,15	230	12,25	10,35	—	8,2 ²	5,3	0,0	0,0	
2,75	2,27	2,10	Mo—0,83	41,65	241	—	10,35	0,8	0,8	2,2	0,0	0,0	
2,72	2,06	2,50	Mo—0,83	36,75	241	—	12,11	10,0	0,0	0,0	0,0	—	
2,72	2,06	2,50	Mo—0,83	36,75	241	—	13,65	16,7	3,7	0,0	0,0	—	
2,72	2,06	2,50	Mo—0,83	36,75	241	—	16,8	30,0	6,7	1,6	0,0	—	

¹ 0,7%. Мп. 0,2% Р, 0,10% S, за исключением никелевого чугуна, где S=0,15%

² От 0 до 500 час.

Твердость

Твердость как результат действия целого ряда факторов не всегда может быть отнесена к числу простейших свойств. В об-

щем, а также для обыкновенных литейных чугунов, твердость (indentation hardness), например по Бринелю и по Роквеллу, возрастает вместе с увеличением прочности. Испытание твердости по способу Бринеля или Роквелла оказывается очень полезным в процессе контроля производства или для проверки качества наиболее ответственного литья. Пользоваться ими для спецификаций нужно, однако, с большой осторожностью, поскольку твердость, определяемая этими способами, не является простой функцией какого-либо свойства, будет ли это прочность, сопротивление износу или обрабатываемость. Испытание твердости по Бринелю обыкновенно производится посредством вдавливания шарика диаметром в 10 мм под нагрузкой в 3000 кг и выдержкой под нагрузкой в течение 30 сек., хотя практически в большинстве чугунов, после двух или трех секунд действия такой нагрузки, никаких деформаций уже не происходит. Для испытания небольших образцов можно брать шарик диаметром в 5 мм под нагрузкой в 750 кг (при этом удельное давление на шарик остается прежним), и, таким образом, результаты испытаний будут сравнимы.

Испытание твердости чугуна по Роквеллу производится обыкновенно по шкале В (диаметр шарика $1/16''$), хотя иногда считают более целесообразным испытывать твердые чугуны (штампы, ролики и т. д.) алмазным конусом, а для очень мягких чугунов пользоваться шариком с диаметром в $1/8''$.

С успехом применяются также и другие приборы для определения твердости, хотя работа на них, особенно с малыми пенетраторами, требует большой осторожности из-за особенностей структуры чугуна; например, приходится считаться с опасностью получения или очень малых чисел твердости, если пенетратор попадает на графитные включения, или очень больших — если шарик попадает на фосфидное включение; поэтому приходится производить несколько замеров для получения средних показаний.

Для закаленных или белых чугунов хорошие результаты дает склероскоп. Петренко [33] исследовал зависимость между числами твердости при испытании по Бринелю и по Роквеллу и нашел, что между показаниями шкалы В Роквелла и числами твердости по Бринелю существует следующая зависимость:

$$H_B = \frac{7300}{130 - R_{\frac{1}{16}}}$$

В пределах обычных значений твердости (70—105 по Роквеллу или 130—280 по Бринелю) разница никогда не превышает десяти единиц по Бринелю или 5 единиц по Роквеллу.

Влияние толщины стенок

Колебания значений прочности в зависимости от толщины стенок или от скорости охлаждения изучались многими исследователями. Ниже приводятся (табл. 33) данные опытов Ротера и Мазури [Rother, Mazurie, 34].

Таблица 33

Временное сопротивление разрыву образцов диаметром в 25,4 мм (1") — необработанных, кг/мм ²	Временное сопротивление разрыву различных образцов в % от сопротивления образца диаметром 25,4 мм (1")			
	38,1 мм 1,5"	50,8 мм (2")	63,5 мм (2,5")	76,2 мм (3")
14,91	77	72	71	67
16,66	81	69	61	53
18,13	89	74	55	46
Среднее 16,59 (мягкий чугун) . .	82	72	62	55
22,96	94	84	75	73
25,42	85	83	76	76
Среднее 24,22 (машиностроитель- ный чугун)	90	84	76	75

Борнштейн [Bornstein, 35] также приводит результаты своих тщательно проведенных опытов (табл. 34):

Таблица 34

Временное сопротивление разрыву образцов диаметром в 31,75 мм (1,25") — необработанных, кг/мм ²	Временное сопротивление разрыву различных образцов в % от сопротивления образца диаметром в 31,75 мм (1,25")					
	20,72 мм (13" 16)	44,45 мм (1,75")	57,15 мм (2,25")	69,85 мм (2,75")	82,55 мм (3,25")	101,6 мм (4")
14,77	134	80	64	—	—	—
15,4	—	77	64	66	68	64
21,7	—	86	74	71	63	61
24,22	122	81	71	—	—	—
37,8	—	94	89	87	80	71

Наконец, в результате изучения 37 рыночных сортов литейных чугунов были получены следующие средние данные (табл. 35).

В табл. 36 приводятся данные для некоторых сортов высококачественного никелевого чугуна.

Все эти испытания были проведены с образцами, выточенными из литых брусков; таким образом, образцы являются лишь частями первоначального бруска и притом наименее прочными.

Более правильную картину действительной зависимости между толщиной стенок и прочностью дает испытание на изгиб, характеризующее прежде всего свойства наружных слоев образца, составляющих главную массу материала. Так например, в табл. 37 приведены данные Rother и Mazurie [34], полученные испытанием на изгиб необработанных образцов при расстоянии между опорами в 304 мм (12").

Таблица 35

Временное сопротивление разрыву образцов диаметром 30,5 мм (1,2") необработанных, кг/мм ²	Временное сопротивление разрыву различных образцов в % от сопротивления образца диаметром		
	19,0 мм (0,75")	50,8 мм (2")	76,2 мм (3")
16,52	122	65	51
17,78	107	71	57
Среднее 17,15 (мягкий чугун) . .	115	68	54
24,64	104	69	53
25,2	104	77	63
25,83	101	84	66
Среднее 25,2 (машиностроительный чугун)	103	77	61

Таблица 36

Результаты испытаний высококачественных никелевых чугунов

(C o u l e)

Общее содержание углерода, %	Кремний, %	Никель, %	Временное сопротивление разрыву образцов с диаметром 31,75 мм (1,25"), кг/мм ²	Временное сопротивление разрыву образцов диаметром в 31,75 мм в % от прочности образцов диаметр в 76 мм, (необработанных)	
				на поверхности	в середине
2,73	1,54	0,95	37,8	94	67
2,73	1,57	1,34	44,44	90	85
2,59	1,42	2,01	36,82	81	75
2,70	1,71	2,41	48,02	87	78
2,92	1,45	4,01	38,5	88	82

Табличные данные показывают, как сильно влияет толщина стенок, причем в мягких чугунах падение сопротивления изгибу при переходе от стенки толщиной в 25 мм к толщине в 75 мм составляет всего лишь 21% вместо 45%, полученных Rother и Mazurie при испытаниях на разрыв. Точно так же получаются более удовлетворительные результаты для машиностроительных чугунов.

Данные Bornstein [35], приведенные в табл. 38, подтверждают результаты, полученные Rother и Mazurie. Здесь также можно наблюдать заметную разницу между изгибом и растяжением.

Таблица 37

Влияние толщины стенок на коэффициент сопротивления изгибу

Коэффициент сопротивления изгибу образца диаметром в 25,4 мм (1") — необработанного, кг/мм ²	Сопротивление изгибу различных образцов в % от сопротивления образца диаметром в 25,4 мм (1")			
	38,10 мм (1,5")	50,8 мм (2")	63,50 мм (2,5")	76,2 мм (3")
Мягкий чугун				
34,3	96	88	80	76
37,1	93	84	83	78
39,76	95	88	86	84
—	—	—	—	—
Среднее 37,03	95	87	83	79
Машиностроительный чугун				
48,58	95	96	92	87
49,7	94	94	84	81
—	—	—	—	—
Среднее 49,14	95	95	88	84

Таблица 38

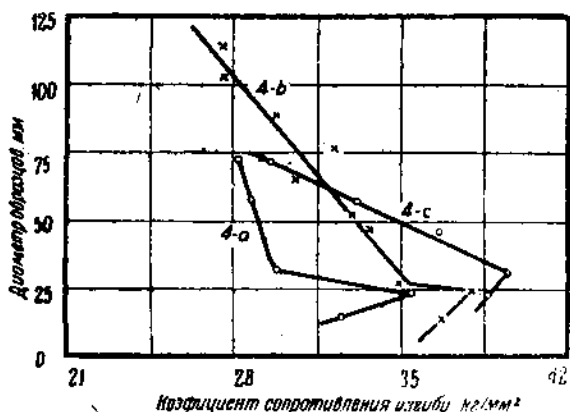
Влияние толщины стенок на коэффициент сопротивления изгибу

Коэффициент сопротивления изгибу образца диаметром в 30,4 мм (1,2") — необработанного, кг/мм ²	Коэффициент сопротивления изгибу различных образцов в % от сопротивления образцов диаметром в 30,48 мм		
	19,05 мм (0,75")	50,8 мм (2")	76,2 мм (3")
Мягкий чугун			
29,26	133	94	78
30,1	121	91	76
Среднее 29,68	127	93	77
Машиностроительный чугун			
40,88	115	95	80
42,63	113	100	94
45,5	117	97	82
Среднее 42,98	115	97	85

Разница эта до некоторой степени объясняется тем (ср. с фиг. 22), что отношение сопротивления изгибу к временному сопротивлению разрыву изменяется обратно временному сопротивлению разрыву; в основном, однако, она зависит от различия в природе самих образцов, испытываемых на разрыв (сердцевина бруска) и на изгиб, в которых действующий наружный слой наиболее значителен и прочен.

Сопоставление результатов всех этих испытаний показывает, что твердые чугуны менее подвержены влиянию толщины стенок, чем мягкие. Точно так же по мере увеличения размеров образцов в большинстве случаев наблюдается определенное выпрямление кривой потери прочности.

Хотя ни один из вышеприведенных результатов испытания этого и не показывает, тем не менее для каждого из чугунов имеется определенный максимум (пик), другими словами, при быстром охлаждении прочность до известного предела увеличивается, а затем, иногда



Фиг. 33. Сопротивление изгибу в зависимости от толщины образцов (Peagse)

очень резко снижается.

Обычно это наблюдается в чугунах с содержанием структурно свободного цементита (чугун начинает переходить в половинчатый).

Это явление изображено Пирсом [Peagse, 37] на фиг. 33 для трех различных по своему составу чугунов.

Кривые, расположенные на диаграмме вне максимумов,

не относятся к настоящим серым чугунам.

Поскольку прочие свойства, рассматриваемые в этой главе, уже были разобраны с точки зрения их связи с прочностью, нет надобности останавливаться специально на зависимости их от толщины стенок, так как, вообще говоря, отношение их к прочности то же самое, независимо от способа, которым достигается эта прочность.

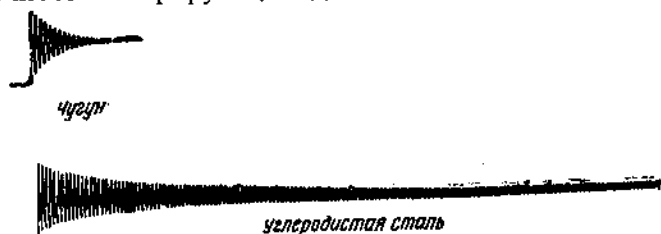
Способность затухания вибраций

Явление затухания вибраций, лишь в последнее время обратившее на себя пристальное внимание конструкторов, выражается удельным количеством работы, переводимой в тепло единицей объема материала в течение переменного симметрического цикла напряжений. Для испытания чугуна на способность затухания вибраций больше всего подходит прибор Феппл-

Пертца (Foerpl-Pertz), дающий диаграммы, подобные изображенным на фиг. 34 [38]. Диаграммы эти показывают относительную длительность сотрясательно-крутящего импульса в чугунах и стальном образцах.

Роль заглушающей (в отношении вибраций) способности в машинах и в инструментах настолько очевидна, что нет надобности останавливаться на этом подробнее.

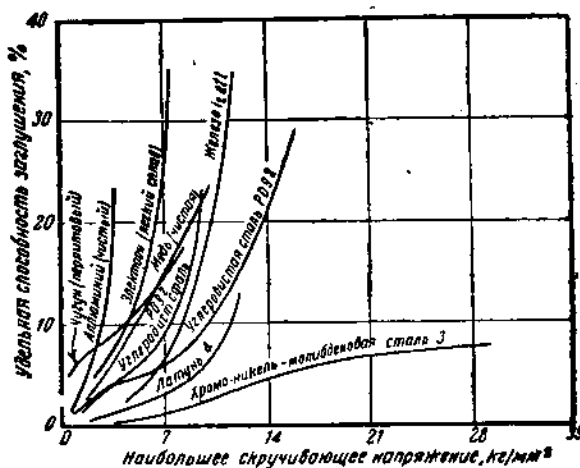
Может быть не всегда отдадут себе отчет в том, что фактическая прочность вибрирующей детали может оказаться гораздо



Фиг. 34. Затухание вибраций в чугуне и в стали при испытании прибором Фепль-Пертца

большей, если сделать эту деталь из материала с большей заглушающей способностью, тогда как если взять материал, хотя и более прочный, но с малой заглушающей способностью, действительная прочность детали может оказаться сниженной. В первом случае вибрации будут поглощаться или затухать, тогда как в последнем

они могут достигнуть опасных пределов. На фиг. 35 [Heydekampf 39] изображена сравнительная заглушающая способность перлитового чугуна, двух углеродистых сталей, латуни и хромо-никель-молибденовой стали. Как указывает Гейдекамф, способность затухания вибрации совершенно точно отражается диаграммой гистерезиса при испытании на переменный изгиб;



Фиг. 35. Способность затухания вибраций для различных материалов (von Heydekampf)

таким образом, заглушающая способность меняется вместе с пластической деформацией, которая, в свою очередь, изменяется, вообще, обратно относительному модулю упругости. Из этого следует, что чем жестче (stiffer) чугун, тем меньше его заглушающая способность.

Акустические свойства чугуна также являются функцией модуля упругости. Акустическое сопротивление (resistivity) принимается равным 255 для обыкновенных литейных чугунов, тогда как для стали оно равно 390 и для латуни 232. Скорость звуковых волн в чугуне, выраженная в метрах в секунду, принимается равной 3658 м/сек, для стали она равна 5029 м/сек и для латуни 2743 м/сек. При возрастании температуры чугуна скорость волн уменьшается. Акустическое сопротивление определяется по формуле

$$u = \sqrt{E\rho},$$

где E — модуль упругости, а ρ — удельный вес.

Так как обе эти величины становятся меньше при возрастании температуры, то, следовательно, при нагревании чугуна уменьшается и акустическое сопротивление. Акустические свойства находятся в тесной связи с заглушающей способностью, так как продолжительность звука, издаваемого вибрирующим телом, соответствует той именно части диаграммы затухания, которая воспринимается ухом.

Влияние повышенных температур

При быстром способе испытания серых чугунов на разрыв в пределах температур от комнатной до 425° наблюдаются лишь очень незначительные изменения в их прочности по сравнению с начальной прочностью и независимо от класса и сорта чугуна.

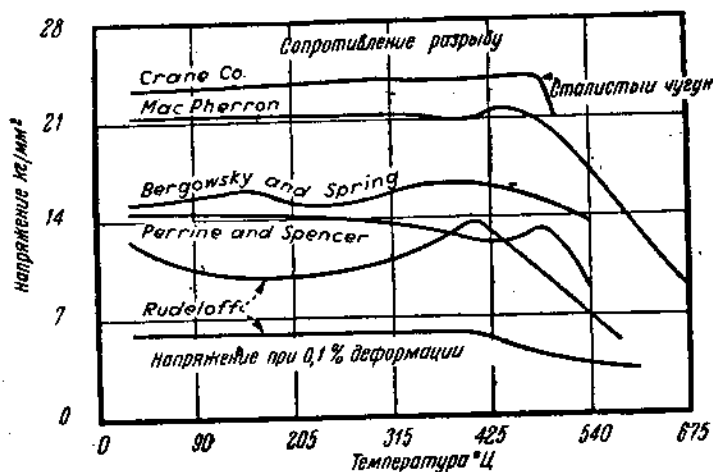
В отдельных случаях происходит небольшое увеличение прочности в интервале температур от 315 до 425°. При нагреве сверх 480° прочность во всех чугунах резко падает и продолжает падать при дальнейшем повышении температуры. При быстром способе испытания в пределах температур от комнатной до 425° или несколько выше временное сопротивление серого чугуна разрыву вполне постоянно, как показано на фиг. 36—40.

При нагревании чугуна до 425° предел усталости, если и понижается, то очень незначительно. При температурах выше 425° величина отношения предела усталости к временному сопротивлению разрыву увеличивается. При температурах свыше 650° предел усталости, по данным Мура и Лайона [Moore, Lyon, 41], повидимому, совпадает с величиной временного сопротивления разрыву при длительном действии нагрузки.

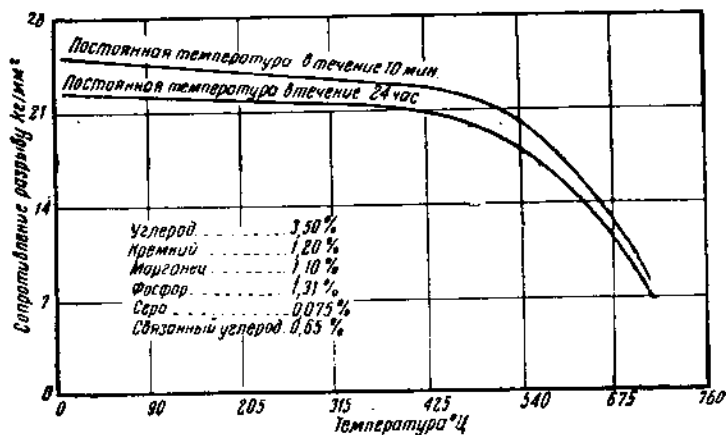
При температурах до 425° твердость по Бринелю, как показывают имеющиеся в литературе данные, остается постоянной.

Диаграммы испытаний показывают, что при повышении температуры относительный модуль упругости¹ становится меньше. На фиг. 41 изображена диаграмма для высококачественного чугуна

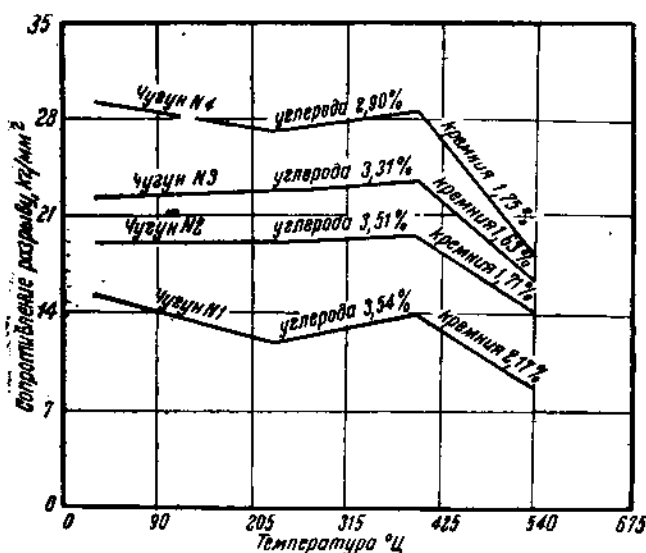
¹ Так как на диаграмме „напряжение—деформация“ кривая чугунов почти с самого начала не имеет прямого участка, то постоянной пропорциональности между напряжением и деформацией не существует, а следовательно, нет и определенного модуля упругости. Термин „относительный модуль упругости“ применяется для качественной характеристики наклона кривых.



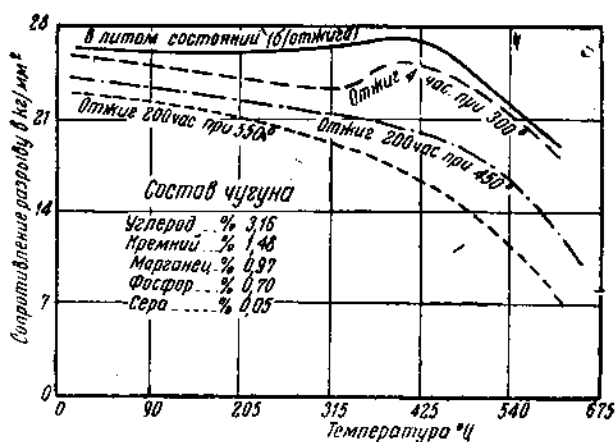
Фиг. 36. Зависимость напряжений в чугуне от температуры (H. J. French, W. A. Tucker)



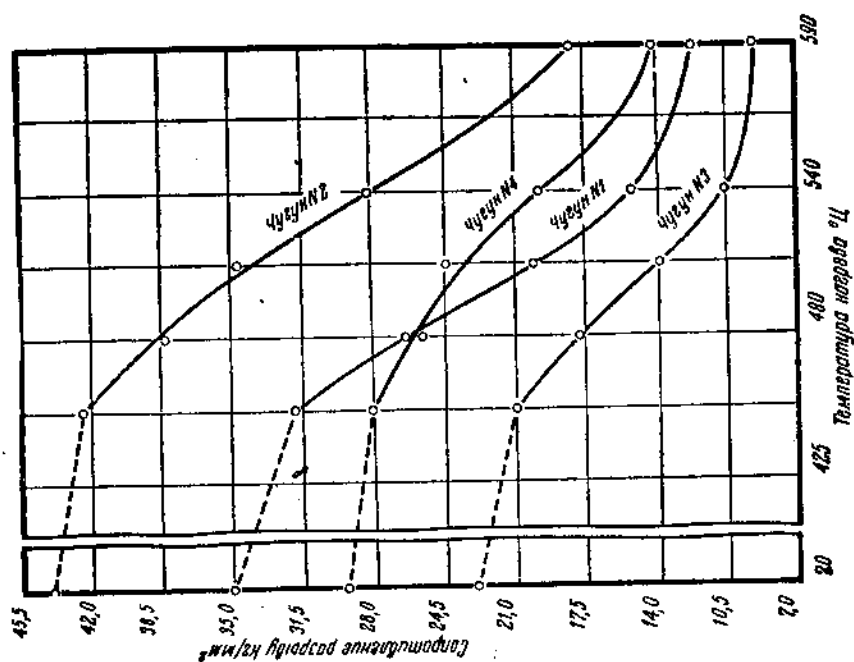
Фиг. 37. Зависимость временного сопротивления разрыву чугуна от температуры (A. Marks)



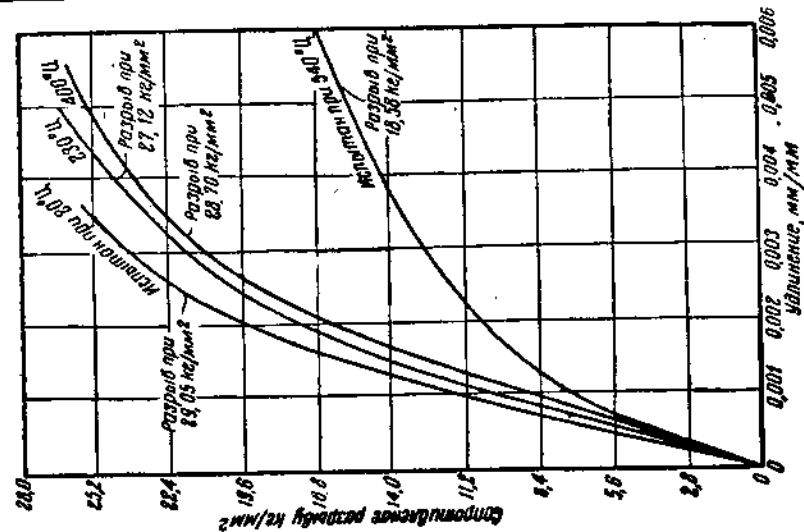
Фиг. 38. Зависимость временного сопротивления разрыву различных чугуна от температуры (J. W. Bolton, J. W. Donaldson)



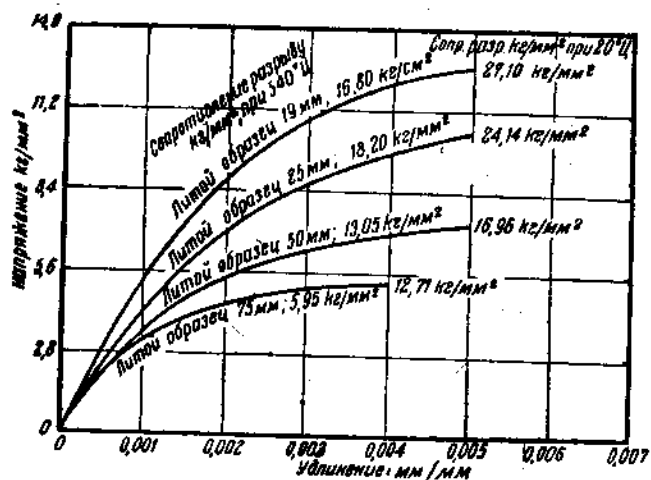
Фиг. 39. Зависимость временного сопротивления разрыву чугуна от температуры



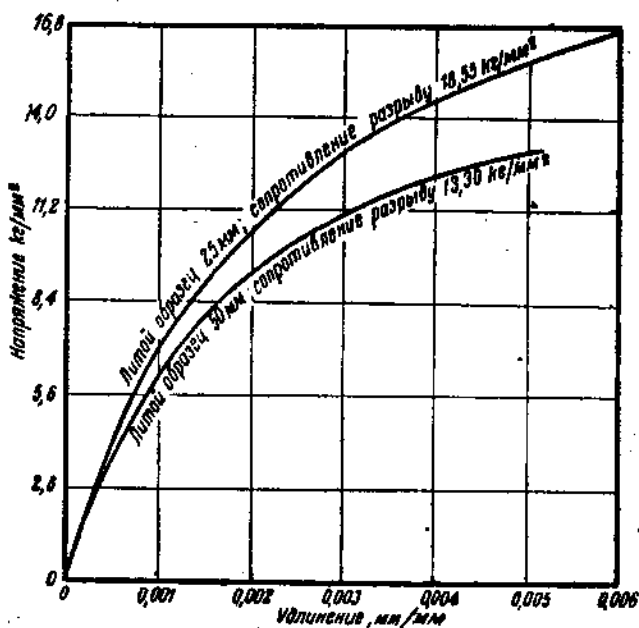
Фиг. 40. Временное сопротивление разрыву чугуна после нагрева в течение 500 час. при различных температурах. Испытания в нагретом состоянии



Фиг. 41. Зависимость между временным сопротивлением разрыву высококачественного чугуна и удлинением (состав чугуна: 2,90% C, 1,75% Si, 1,15% Ni)



Фиг. 42. Зависимость между временным сопротивлением разрыву чугуна и удлинением при 538° (состав чугуна: 3,25% С, 1,70% Si)



Фиг. 43. Зависимость между временным сопротивлением разрыву высококачественного чугуна и удлинением при 538° (состав чугуна 2,90% С, 1,75 Si, 1,15% Ni)

на при комнатной температуре (21°), при 230,400 и 537° . При повышении температуры каждая данная нагрузка дает большее удлинение, и соответственно этому относительный модуль упругости уменьшается. Как временное сопротивление разрыву, так и относительный модуль упругости понижаются при увеличении толщины стенок.

На фиг. 42 и 43 изображены диаграммы для чугунов различных типов и для образцов разных диаметров, испытывавшихся необработанными при 538° . Как отмечено на графиках, диаграммы не полны, так как экстензометр был снят до разрушения образца. Из рассмотрения диаграмм следует, что 1) различные чугуны, испытанные при повышенных температурах, располагаются на диаграмме в том же самом относительном порядке, как и чугуны, испытанные при комнатной температуре; другими словами, чугуны с большими относительными модулями упругости при комнатной температуре остаются более прочными и имеют более высокие модули упругости также и при 538° (фиг. 41 и 43 [2]). При увеличении размеров (толщины) образца как прочность, так и относительный модуль упругости чугуна определенного класса или сорта, при данной температуре уменьшаются; другими словами, сохраняется примерно та же зависимость свойств от толщины стенок, что и при комнатной температуре. Все сказанное относится только к результатам, полученным при быстром способе испытания.

Зависимость сопротивления сжатию от температуры, по данным Ингберга и Сэла [Ingberg Sale, 42], показана на фиг. 44. Диаграмма понятна без дополнительных пояснений. Чугун в этих опытах был довольно низкого сорта, с содержанием 3,52% C, 1,59% Si и 0,72% P.

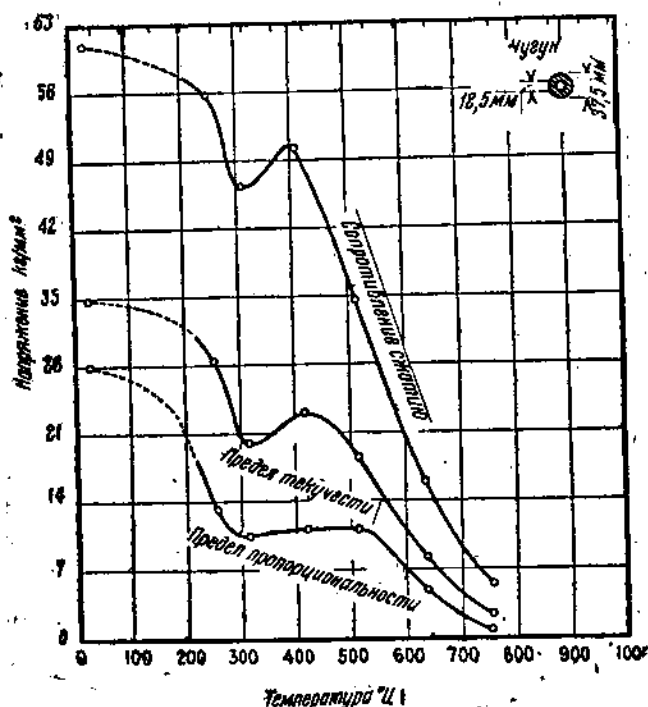
Известно, что серый чугун хорошо сопротивляется износу независимо от температуры. Чугун с успехом применяется в авто- и дизелестроении и для паровых машин. Причина хорошего сопротивления серых чугунов износу лежит в сравнительно большой способности чугуна противостоять заеданию. Это свойство чугуна было обнаружено Мохлем [Mochel, 43], при сравнительном испытании различных металлов при 400° для определения их относительной способности к заеданию. Чугуны, все без исключения, работали хорошо как при трении по чугуну, так и по другим металлам, например монель-металлу и нержавеющей стали, тогда как оба последних сплава очень быстро начинали обнаруживать заедание при трении между собой, но в то же время хорошо работали на трение по чугуну.

Применение отливок из серого чугуна при повышенных температурах лимитируется не только физическими свойствами чугуна, как это показывают испытания, но и склонностью чугунов к росту, о чем подробнее говорится ниже. Несмотря на то, что применение серых чугунов в деталях, находящихся под давлением, ограничивается, согласно американским правилам котлостроения, температурами, не превышающими 230° , однако, повидимому, эти нормы слишком жестки в отношении некоторых из лучших сортов чугуна, применяемых в настоящее время. В других

областях техники отливки из серого чугуна часто применяются при температурах до 370 и даже 425°, а в менее тяжелых условиях — даже и при более высоких температурах. Если условия работы чугунной детали таковы, что опасаться роста нет оснований, лучшие сорта серого чугуна, вероятно, могут применяться и при температурах до 425°. В условиях еще более высоких температур чугуном пользоваться не рекомендуется вследствие возможности его графитизации.

Влияние низких температур (ниже 0°)

При действии низких температур на серый чугун, повидимому, заметного ухудшения его физических свойств не происходит. Временное сопротивление разрыву и твердость по Бринеллю ос-



Фиг. 44. Прочность на сжатие чугуна при постоянных температурах

таются без изменения или слегка увеличиваются, как показывают испытания при различных температурах, до —194°. При температурах, равных —80° и ниже наблюдается незначительное уменьшение ударной прочности. Заметного увеличения хрупкости или изменения характера излома при —194° не наблюдается. В мягкой стали с удлинением в 23,5%, охлаждение до —194° влечет уменьшение удлинения до 4%. При конструировании деталей для низких температур необходимо учитывать температурное сжатие и возможность образования внутренних напряжений.

Термин «рост» в применении к серому чугуну обозначает остающееся увеличение его объема, происходящее в некоторых случаях при повторном нагревании и охлаждении. Напряжения, обусловливаемые внешними причинами, могут и не принимать участия в процессе роста. В обычных условиях более или менее значительный рост чугуна при температурах ниже 540° , наблюдается очень редко. В присутствии некоторых корродирующих агентов, как например перегретого пара, определенные сорта чугуна склонны к росту при значительно более низких температурах.

Явление роста, как показывает само слово, состоит в том, что чугун получает остающееся приращение объема, достигающее иногда 50% и больше. Одновременно происходит очень значительное снижение прочности и увеличение хрупкости. Удельный вес падает. В отдельных случаях механическая прочность и вязкость чугуна уменьшаются до такой степени, что чугун как машиностроительный материал совершенно теряет всякую ценность.

К числу причин, вызывающих необратимый процесс роста, относятся:

- а) расширение, вызываемое графитизацией,
- б) коррозия,
- в) температурные перепады,
- г) аллотропические изменения (вызывающие расширение и сжатие),
- д) давление растворенных в чугуне газов (многими оспаривается).

Обыкновенно перечисленные причины действуют совместно, и большинство из них взаимно усиливает действие друг друга.

Для удобства рассмотрения, пределы нагрева и охлаждения чугуна можно распределить на три группы.

1. Нагрев при температурах ниже интервала графитизации, примерно до $370-425^{\circ}$.

2. Нагрев при температурах графитизации, но ниже температур аллотропических превращений, примерно в пределах от 450 до 705° для обыкновенных серых чугунов.

3. Нагрев при температурах аллотропических превращений и выше, примерно при $715-725^{\circ}$ и выше.

При нагреве до $370-425^{\circ}$ действие первой и четвертой из вышеперечисленных причин роста не проявляется. По данным Пивоварского (могущим считаться типичными), образцы чугуна, при нагреве их в рапсовом масле (для предупреждения коррозии) не обнаруживали роста вплоть до 300° . Однако, при 75-часовом нагреве в атмосфере пара крупнозернистые чугуны начали расти, а при 350° коррозия проникала до самой сердцевины образцов крупнозернистых чугунов. Мелкозернистые чугуны оказались более устойчивыми в этом отношении, так как коррозия в атмосфере пара, даже при 450° , была ничтожной. Это явление хорошо известно в отношении клапанов, фитингов, трубопроводов и других частей, работающих под давлением перегретого пара. Для

правильно сконструированных здоровых и плотных отливок нагрев до 315—375° серьезной опасности в отношении роста не представляет. Чугуны пористые корродируют скорее, так как окислительные газы имеют возможность легче проникать внутрь массы чугуна. Не одна только опасность роста заставляет избегать применения серого чугуна для перегретого пара высокого давления. Коррозия является очень серьезным фактором роста в температурном интервале примерно от 15 до 425°. Продукты коррозии занимают больший объем, чем исходный металл, из которого они образовались, и, таким образом, уменьшают его прочность. Плотное строение чугуна предотвращает проникновение корродирующих газов и, следовательно, препятствует росту.

Перепады температур способствуют образованию трещин. Так например, наружный слой отливки достигает определенной температуры при нагреве скорее, чем сердцевина и, следовательно, расширяется сильнее, прежде чем во всей отливке произойдет выравнивание температуры. В результате в отливке возникают напряжения, почти неизбежно ведущие к образованию трещин; наоборот, при охлаждении, наружный слой, сжимающийся быстрее, стремится сжать сердцевину, еще продолжающую расширяться, напряжения усиливаются, и трещин образуется больше. Не надо забывать, что серый чугун представляет собой материал сравнительно не вязкий; поэтому быстрая смена нагрева и охлаждения, вне всякого сомнения, должны повлечь за собой образование множества незаметных для глаза трещин. Эти трещинки не исчезают, и в конечном итоге, объем изделия может увеличиться. Кроме того трещины облегчают доступ корродирующих агентов внутрь. Расширение заключенных в чугуне газов, если таковые в нем имеются, также может служить одной из причин местных напряжений и невидимых трещин. При нагреве до 480—705° действие факторов, сопутствующих нагреву до 370—425°, во многих отношениях усиливается под влиянием более высокой температуры. Лишь в одном отношении высокая температура оказывает благоприятное действие, а именно: она способствует увеличению пластичности или вязкости металла, но в этот момент начинает действовать новый фактор — графитизация.

Термодинамически стабильным состоянием серого чугуна, как разновидности сплавов железа с углеродом, является система феррит — графит. Перлит не стабилен и всегда стремится к распаду на графит и феррит, занимающие больший объем, чем исходный перлит.

При температурах ниже 425° скорость распада перлита на графит настолько ничтожна, что практически никакого значения не имеет. При 480° уже можно наблюдать признаки начинающейся графитизации, и с этого момента скорость распада начинает возрастать с температурой. При температурах выше точки превращения (727°) начинается частичное обратное растворение графита, непрерывно усиливающееся по мере повышения температуры. Таким образом в интервале от 480 до 705° скорость роста увеличивается вместе с температурой как по причине графитизации,

так и вследствие усиливающегося действия корродирующих агентов, а равно и вследствие увеличения температурных перепадов.

Примерно около 727° наступает аллотропическое превращение, сопровождаемое заметными объемными изменениями. При означенной температуре смесь перлита с ферритом α -феррит и цементит превращается в аустенит (α -феррит и растворенный карбид). Это изменение объема отливки совместно с температурными перепадами может очень легко привести к образованию трещин. Вместе с тем усиливается под влиянием повышающейся температуры и действие большей части других причин, вызывающих рост чугуна. Скорость коррозии возрастает, графитизация протекает гораздо быстрее, а одновременно возрастает и давление заключенных в чугуне газов, если таковые имеются. Так как пластичность чугуна при высоких температурах увеличивается, то она частично может противодействовать склонности чугуна к образованию трещин.

Борьба с ростом. Рассмотрим сначала нормальный (нелегированный) серый чугун. Очевидно, чугун более мелкозернистый, более плотный, с незначительным коэффициентом расширения и наиболее химически устойчивый будет и самым ростоустойчивым.

Белый чугун, не содержащий графита, графитизируется гораздо труднее, чем серый чугун, частично уже графитизированный, поэтому белый чугун лучше сопротивляется росту.

Кремний, как элемент графитизирующий, способствует росту при температурах выше, примерно, 480° . Алюминий и никель также способствуют росту. Тем не менее при замене кремния никелем рост может уменьшиться, так как никель является менее сильным графитизатором по сравнению с кремнием, и графитизирующее действие никеля прекращается при эвтектичной температуре или около этого. При высоких температурах кремний в силикоферрите, повидимому, легко окисляется в кремнекислоту (SiO_2), занимающую больший объем. Это уже само по себе может способствовать росту чугуна.

Хром, как стабилизатор карбида, обычно сильнее, чем все прочие элементы, препятствует росту. Подобное же действие оказывают вольфрам и сера. Марганец и сера также являются стабилизаторами карбида, причем каждый из них нейтрализует действие другого. С этой точки зрения большое содержание серы при малом содержании марганца, или наоборот, представляется желательным. Фосфор, образующий при большом содержании стэдитовые оболочки, препятствует прониканию корродирующих агентов внутрь чугуна и, таким образом, замедляет рост. Малоуглеродистые чугуны с мелкозернистой металлической основой и при наличии стабилизированного карбида должны быть более ростоустойчивыми по сравнению с высокоуглеродистыми чугунами, содержащими графит в форме крупных включений.

Плотнозернистое строение, достигаемое перегревом чугуна, надлежащий состав, правильную скорость охлаждения и т. п. нужно считать желательными.

Правильно изготовленная форма, горячий чугун и правильное

питание отливки — необходимые условия для получения здорового литья.

Продуманная конструкция отливки во многом способствует предотвращению брака, зависящего от неравномерного распределения температур в отливке. Толстостенные отливки чаще всего получают крупнозернистыми и более склонны к неравномерному распределению температур. В отливках со стенками неодинаковой толщины температура распределяется неравномерно, вследствие этого в них возникают внутренние напряжения, служащие причиной брака.

Степень влияния скрытых газов полностью еще не выявлена.

Применением высоколегированных чугунов можно избежать аллотропических превращений.

В заключение можно упомянуть о том, что недостатки обуславливаемые ростом, часто объясняются применением сортов чугуна, не отвечающих условиям работы. Несмотря на то, что по американским правилам котлостроения (ASME, Boiler Const-uction Code) не разрешается применять чугун для деталей, работающих под давлением при температурах свыше 230° , тем не менее можно указать целый ряд областей применения чугуна, в которых благодаря правильному подбору материала чугун служит ряд лет вполне удовлетворительно даже при более высоких температурах. Хотя не рекомендуется применять серый чугун в областях, лежащих за обычными пределами его применения, однако следует подчеркнуть, что употребление высокосортных чугунов, более доступных в настоящее время, чем прежде, может оправдывать расширение области применения чугуна.

Обрабатываемость чугуна

Обрабатываемость металла определяется 1) по сроку службы обрабатывающего инструмента, 2) по характеру обработанной поверхности и 3) по затрате энергии на обработку.

Так как различие в обрабатываемости, определяемое сроком службы инструмента, имеет чрезвычайно большое значение с точки зрения практики, то большая часть того, о чем говорится ниже, относится именно к этому определению обрабатываемости, и лишь вкратце рассматривается обрабатываемость с точки зрения отделки поверхности.

Состав, структура и физические свойства чугунов колеблются в широких пределах, и в зависимости от этих факторов меняется и обрабатываемость, начиная от легкообрабатываемых чугунов и кончая чугунами, поддающимися обработке с большим трудом. На одном конце этого ряда стоят чугуны, отливаемые в постоянные формы и затем отжигаемые — такие чугуны обрабатываются очень легко — на другом конце стоит белый, или закаленный чугун.

Хорошая обрабатываемость отожженных отливок и полученных в постоянных формах объясняется тем, что в них нет связанного углерода, а наоборот, содержится много свободного углерода в виде очень мелких включений при полном отсутствии

пригара песка на поверхности. Закаленный, или белый, чугун обрабатывать чрезвычайно трудно, так как главной структурной составляющей его является карбид железа в перлите и в виде структурно свободного цементита—при отсутствии графита. Между этими крайними сортами чугунов располагаются все прочие виды чугуна с различной степенью обрабатываемости в зависимости от количества и распределения твердых и мягких составляющих. Все эти составляющие могут быть расположены в следующий ряд в порядке их твердости, начиная с самых мягких:

а) свободный углерод (графит или углерод отжига в виде хлопьев);

б) силикоферрит (раствор кремния в железе);

в) сплав силикоферрита с другими металлами, растворимыми в железе;

г) перлит — чередующиеся пластинки феррита и цементита;

д) легированный перлит;

е) сорбит;

ж) стэдит (фосфид железа), неметаллические включения в виде песка, пригоревшего к поверхности отливки или заключенного внутри чугуна, сернистый марганец, силикаты и т. д.;

з) структурно свободный цементит (карбиды железа, марганца, хрома).

Все перечисленные составляющие в зависимости от их количества и распределения определяют собой в той или иной мере большую или меньшую степень обрабатываемости чугунов.

Для более детального изучения всех возможных степеней обрабатываемости можно классифицировать чугуны по их микроструктуре на следующие типы:

а) ферритовый чугун, состоящий из свободного углерода и силикоферрита;

б) перлито-ферритовый чугун (свободный углерод, силикоферрит и перлит);

в) перлитовый чугун (свободный углерод и перлит);

г) половинчатый чугун (перлит и структурно свободный цементит в количестве, достаточном для образования половинчатого чугуна);

д) белый чугун (перлит и структурно свободный цементит).

Ферритовый чугун. Ферритовый литейный чугун обыкновенно представляет собой мягкий, легко обрабатываемый чугун небольшой прочности. Небольшие различия в обрабатываемости чугунов этой группы зависят от следующих причин:

а) увеличения общего содержания углерода — обрабатываемость улучшается;

б) увеличения содержания кремния—обрабатываемость ухудшается;

в) измельчение частиц свободного углерода — обрабатываемость улучшается.

Остаточный цементит, не распадающийся при отжиге, или стэдит в небольших количествах почти никакого влияния не оказывают, однако в присутствии более значительных количеств этих

составляющих или при наличии ликвации (например по соседству с усадочными раковинами) обрабатываемость ухудшается.

Перлито-ферритовые чугуны. Чугуны, входящие в эту группу, могут быть различной твердости, начиная от мягких чугунов с твердостью около 130 по Бринелю, содержащих очень немного перлита, и кончая довольно твердыми чугунами средней прочности, примерно с твердостью до 220 по Бринелю и с временным сопротивлением разрыву в $26,6 \text{ кг/мм}^2$ с преобладанием перлита и лишь с очень небольшим содержанием феррита. Обрабатываемость чугунов этой группы приблизительно обратно пропорциональна прочности, причем оба эти свойства зависят от содержания перлита и общего углерода. Чугуны, содержащие много общего углерода и мало перлита, обрабатываются подобно чугунам ферритовой группы. Обрабатываемость малоуглеродистых чугунов, содержащих мало феррита, значительно хуже, особенно в тех случаях, когда распределение графита, в зависимости от способа выплавки, дает чугун высокой прочности.

Наличие структурно свободного цементита или стэдита в чугунах этой группы влечет за собой быстрый износ режущего инструмента, так как присутствие перлита способствует удержанию твердых карбидов или стэдита на месте, и инструменту приходится, таким образом, прорезать эти твердые включения, вместо того чтобы выкрашивать их, как в мягких ферритовых чугунах. В чугунах с одинаковым содержанием общего углерода при равной скорости охлаждения — увеличение содержания кремния способствует уменьшению количества перлита (связанного углерода) и увеличению количества графита, вследствие чего обрабатываемость улучшается. С другой стороны, изменение скорости охлаждения чугунов с различным содержанием кремния в целях получения определенного количества перлита и графита влечет за собой ухудшение обрабатываемости в более кремнистых чугунах, так как кремний, растворяющийся в железе, увеличивает твердость чугуна.

Перлитовые чугуны. Обрабатываемость чугунов этой группы подобна обрабатываемости чугунов перлитно-ферритовой группы при небольшом содержании в них свободного феррита. Наличие массивов структурно свободных карбида и стэдита в чугунах этой группы действует разрушающе на режущий инструмент. По мере возрастания твердости и прочности, даже при отсутствии структурно свободных карбида и стэдита, обрабатываемость становится хуже. Для увеличения прочности или сопротивления износу можно применять легированные чугуны. Легирование влияет на обрабатываемость в той мере, в какой легирующие элементы способны образовывать или, наоборот, предотвращать образование карбидов и, таким образом, воздействовать на прочность или твердость чугуна.

Половинчатый чугун. Благодаря наличию значительных количеств структурно свободного цементита в половинчатом чугуне обрабатывать его можно только с гораздо меньшими скоростями. Чугуны этой группы применяются на практике редко.

Белый чугун. Обработка белого чугуна по самой его природе наиболее затруднительна. Обработка протекает на малой скорости, как в случае закаленного чугуна, в большинстве случаев путем обдирки и шлифовки на наждачном круге. Чем ниже общее содержание углерода в белом чугуне, тем легче его обрабатывать.

Общие замечания. При известных условиях можно получить в одной и той же отливке структуры, принадлежащие к двум или более из вышеразобранных типов чугунов, так например, для автомобильного цилиндрического блока с неравномерной толщиной стенок желательно, чтобы твердость внутренних стенок цилиндра была возможно большей и чтобы вместе с тем не ухудшалась обрабатываемость быстро охлаждавшихся более тонких частей блока. Для того чтобы совместить эти свойства в одной отливке из обыкновенного углеродистого чугуна с общим содержанием углерода около 3,25%, необходимо довести содержание в нем кремния примерно до 2,0—2,4%, тогда твердость внутренних стенок цилиндра будет равна примерно 160—180 по Бринелю. Если твердость увеличить до 200 за счет снижения содержания кремния хотя бы до 1,8%, то в тонких стенках и в углах появятся твердые пятна белого чугуна, состоящие, главным образом, из структурно свободного цементита, практически не поддающегося обработке. Одним из способов увеличения твердости стенок цилиндра без сопутствующего образования твердых мест во фланцах и в углах служит увеличение содержания кремния примерно до 2,75% и одновременная присадка 0,5% Cr. Чаше, однако, уменьшают содержание кремния и прибавляют никель или никель с хромом. Никель предотвращает образование структурно свободного цементита в быстро охлаждающихся стенках и в то же время увеличивает твердость перлитовой основы. При присадке 1,00—1,50% Ni и около 0,5% Cr можно повысить твердость внутренних стенок цилиндра до 225—250 по Бринелю, причем обрабатываемость блока даже в тонких частях несколько не ухудшается.

Чугун с малым содержанием кремния, но содержащий никель или никель с хромом, обрабатывается легче даже при значительно большей твердости, чем без легирующих присадок, несмотря на то, что степень обрабатываемости таких легированных чугунов приблизительно обратно пропорциональна твердости. Эта способность чугунов с твердостью в 225—250 по Бринелю поддаваться обработке зависит от отсутствия структурно свободного цементита в металлической основе чугуна. В обыкновенных углеродистых чугунах, как только твердость их достигает 200 по Бринелю, образуется преимущественно в углах и в ребрах масса карбидов и других твердых включений, преждевременно разрушающих инструмент. Под «другими твердыми включениями» подразумевается часто встречающиеся в чугунах включения крупночешуйчатого сетчатого строения, напоминающие по виду сорбит с большим содержанием связанного углерода в растворенном состоянии. По границам этой сетки часто встречаются крупные включения цементита.

Хром образует хромистые карбиды, так что при добавке уже 0,25% Cr в обыкновенный чугу́н, который сам по себе лежит уже на границе обрабатываемости, получается чугу́н, практически не поддающийся обработке. Поэтому на практике принято присаживать хром одновременно с таким элементом, который способен предупредить образование карбидов, как например с никелем, или с повышенной добавкой кремния. Для придания чугу́ну прочности и увеличения сопротивления износу часто вводят в чугу́н молибден. Хотя молибден и не относится к числу элементов, предупреждающих образование карбидов, однако при отсутствии прочих факторов, способствующих образованию карбидов, и при добавке его с целью увеличения твердости и прочности обрабатываемость чугу́на улучшается обратно пропорционально твердости или прочности.

Характер поверхности. Снятие литейной корки затрудняется наличием пригоревшего песка. Поверхностная обработка чугу́на при наличии пригара песка быстро выводит инструмент из строя. Для того чтобы предохранить режущую кромку инструмента от затупления, приходится увеличивать толщину стружки. Чем лучше формовочная краска, в смысле предотвращения пригара песка к отливке, тем дольше служит инструмент.

Наряду с пригаром на поверхности некоторых отливок образуется чрезвычайно тонкий слой отбеленного чугу́на. Слой этот иногда можно обнаружить только при самом внимательном исследовании излома отливки. Очевидно, наличие такого слоя должно повлечь за собой быстрое снашивание инструмента. Образование отбеленного слоя может зависеть от чрезмерной влажности формовочной смеси или от неправильного ее состава. Для предупреждения образования отбела полезно вводить в чугу́н легирующие элементы из числа рассмотренных выше.

Обработка поверхности. Характер обработанной поверхности, точность ее и вид определяются глубиной резания, подачей, формой режущей кромки инструмента, скоростью резания и жесткостью режущего инструмента, качеством закрепления отливки на станке и упругостью (flexibility) самой отливки. Точность обработки зависит также от качества инструмента; резцы из углеродистой стали по сравнению с резцами из специальной стали, вообще говоря, дают значительно меньшую точность.

Малейшее смещение отливки или инструмента сверх требуемой подачи вызывает неточность отделки и вибрации. Поэтому станок не должен давать никакой игры в подшипниках и в креплении резца. Для того чтобы резец не прогибался, режущая кромка его должна выступать над суппортом как можно меньше. Чтобы резец не пружинил, кромка его должна иметь достаточные размеры. Отливка также ни в коем случае не должна прогибаться в процессе обработки, что зависит и от способа закрепления на станке.

Иногда в зависимости от размеров и характера отливки почти невозможно избежать того, чтобы отливка не пружинила, даже при снятии самой тонкой стружки, как например при обточке тормозных барабанов большого диаметра. В таких случаях вслед-

ствие вибрации станка начинает дрожать и сама отливка. Рекомендуется обматывать барабан снаружи спиральной пружиной, которая, повидимому, поглощает вибрации, вызываемые обработкой резцом. В этом случае большое значение имеет также правильная конструкция резца.

Характер поверхности с точки зрения ее отделки при соответствующих условиях обработки, зависит, главным образом, от величины графитовых включений и от общего содержания свободного углерода. При большом содержании углерода и кремния толстостенное литье в результате медленного охлаждения в форме содержит крупные графитовые включения в таких количествах, что они почти пересекаются друг с другом и на поверхности отливки, отчего обработанные поверхности, получаются негладкими (происходит выкрашивание металла в промежутках между графитовыми включениями). В высокоуглеродистых чугунах с большим содержанием кремния, при тонкостенном литье, отлитом в песчаные или в постоянные формы, графит получается в мелкораздробленном состоянии в плотной металлической основе; отчего поверхность отливки после обработки выходит также плотной и очень гладкой.

При снятии черновой стружки с крупнозернистого чугуна поверхность отливки получается еще более неровной и изъязвленной вследствие выкрашивания частиц чугуна. Даже в тех случаях когда снимается самая мелкая стружка, поверхность отливки остается ноздреватой по причине большого содержания крупного графита. В некоторых типах чугунов, с мелкозернистым строением и с мелкораздробленным графитом даже толстые стенки получают после обработки плотными и гладкими на поверхности; по мере удаления от поверхности вглубь отливки зерно укрупняется. При снятии мелкой стружки с такого чугуна поверхность отливки получается хорошая. Однако чем крупнее стружка, тем резче проявляется крупнозернистое строение.

Неодинаковая скорость охлаждения различных частей отливки вызывает различие в величине зерна и, как следствие, неодинаковый вид поверхности после обработки.

Сопротивление чугуна износу

Под износом подразумевается механическое или физическое разрушение поверхности, обусловливаемое взаимным трением двух металлов. В результате трения происходит снятие поверхностного слоя металла, влекущее за собой изменение в размерах и, следовательно, нарушение условий правильной работы данной детали, а при продолжительном действии и полное разрушение таковой. Широкое применение чугуна в машиностроении для деталей, подвергающихся износу, свидетельствует, очевидно, о том, что чугун в отношении сопротивления износу является вполне пригодным материалом. Если иметь в виду громадное разнообразие свойств чугуна, зависящее от химического состава,

условий производства чугуна и самих деталей, то возможность неудачи может объясняться незнанием достаточно разработанных условий применения чугуна для этого назначения. С точки зрения сопротивления износу, литейные чугуны могут быть разбиты на два класса: 1) белые, или закаленные чугуны, и 2) серые чугуны.

Белые, или закаленные, чугуны. В условиях большой удельной нагрузки и относительного движения двух деталей белые, или закаленные, чугуны имеют заметное преимущество по сравнению с серыми чугунами. В таких случаях большая твердость белого чугуна служит необходимым условием для предотвращения деформации поверхности. Типичными примерами в этом отношении являются:

1. Высокое удельное давление на деталь при деформации мягких, вязких металлов, например доски для волочения проволоки, закаленные валки, матрицы для глубокой протяжки листов.

2. Высокое удельное давление при соприкосновении двух деталей по небольшой поверхности, например вагонные колеса, кулачки.

3. Истирающее или ударное действие абразивных материалов, например сопла пескоструйных аппаратов, отливки для песчаных насосов.

Состав этих отливок различен в зависимости от их величины и от глубины закаленного слоя. Для получения поверхности с очень большой твердостью добавляется хром.

Серые чугуны. Там, где давление в местах соприкосновения двух поверхностей не слишком велико и когда сами соприкасающиеся поверхности достаточно велики, можно не опасаться деформирования поверхностей, но не исключается возможность заедания. В таких случаях серые чугуны оказываются незаменимыми благодаря наличию в них графитовых включений, распределенных равномерно по всей массе металла и предупреждающих заедание. Меньше всего склонны к заеданию чугуны с большим содержанием графита, но такие чугуны имеют малую прочность и быстро снашиваются в результате истирания. Для того чтобы серый чугун мог хорошо сопротивляться износу он должен содержать достаточное количество связанного углерода и обладать большой твердостью и прочностью. При прочих равных условиях чугун с перлитовой основой лучше сопротивляется износу, чем чугун, содержащий свободный феррит. Из двух чугунов с перлитовой основой лучше сопротивляется износу тот, в котором общее содержание углерода меньше, так как в таком чугуне графитовые включения находятся на большем расстоянии друг от друга и, следовательно, опасность выкрашивания мельчайших частиц с поверхности не так велика.

В литературе встречаются указания на отсутствие зависимости между твердостью по Бринелю и сопротивлением износу. В отдельных случаях это несомненно так. Например высокоуглеродистый чугун с большим содержанием кремния, отлитый в металлическую форму и затем отожженный, будет обладать боль-

шей твердостью по сравнению с малоуглеродистым и среднекремнистым чугуном, отлитым в песчаную форму и охлаждающимся медленно, тем не менее чугун, отлитый в постоянную форму, изнашивается быстрее, чем чугун из песчаной формы. Практика показывает, однако, что при прочих равных условиях более высокая твердость, получаемая за счет снижения содержания углерода, увеличения количества перлита и добавления легирующих элементов, вроде хрома, никеля, молибдена и др., повышает сопротивление износу.

Это неоднократно подтверждалось сравнительными испытаниями тормозных барабанов из обыкновенного цилиндрического чугуна с твердостью около 180 по Бринелю и из малоуглеродистого высококачественного легированного чугуна с твердостью около 260 по Бринелю. Первые изнашивались значительно быстрее, чем последние. Подобного же рода результаты было получено и при других испытаниях.

Цилиндровые блоки легковых автомашин делаются из серого чугуна с твердостью на поверхности внутренних стенок цилиндров около 180 по Бринелю. При надлежащей смазке износ цилиндров получается очень незначительный, примерно от 0,0254 до 0,0508 мм на 35 000 км пробега машины, однако в автобусах и грузовиках, работающих в условиях более тяжелой нагрузки, твердость, равная 180 по Бринелю, уже не может считаться достаточной для предотвращения износа, вследствие чего твердость блоков должна быть не менее 210—260 по Бринелю; в некоторых случаях, когда и эта твердость оказывается недостаточной, приходится прибегать к вставным гильзам из термически обработанного чугуна с гораздо более высокой твердостью. То же можно сказать и о всяких других частях машин, от которых требуется большое сопротивление износу. Типичными примерами таких отливок из серого чугуна, от которых требуется большее сопротивление износу, служат тормозные барабаны, цилиндрические блоки легковых автомашин, автобусов или грузовиков, цилиндры гидравлических прессов, станины и каретки строгальных станков, тормозные колодки и т. д.

Испытание на износ. Целый ряд опытов, произведенных в разное время и разными исследователями для выявления факторов, влияющих на сопротивление чугуна износу, показал, что:

- 1) сопротивление износу возрастает вместе с увеличением количества перлита [51];
- 2) чугуны на перлитовой основе лучше сопротивляются износу [53,57];
- 3) износ пропорционален твердости, наименьший износ дает перлитовый чугун [55];
- 4) сопротивление износу быстро увеличивается по мере увеличения содержания связанного углерода от нуля до 0,60%, в дальнейшем до 0,85% сопротивление износу возрастает медленно [54];
- 5) чугунные отливки, отлитые в постоянные формы, изнашиваются во много раз быстрее, чем отлитые в песчаные при одном и том же содержании связанного углерода [54];

6) износ уменьшается по мере увеличения твердости, однако не всегда [52];

7) сопротивление износу быстро возрастает вместе с возрастанием твердости от 129 до 180 по Бринелю и при дальнейшем увеличении твердости до 260 по Бринелю практически остается постоянным [57];

8) зависимости между твердостью по Бринелю и износом не существует [51];

9) зависимости между износом и химическим составом также не существует [51];

10) при увеличении содержания кремния сопротивление износу ослабевает [53];

11) фосфидная эвтектика ухудшает сопротивление износу, поскольку она образует вещества абразивного характера;

12) фосфор в количествах от 0,1 до 0,75% способствует увеличению сопротивления износу [52];

13) графит действует как смазка и уменьшает износ [51];

14) наименьший износ получается в тех случаях, когда твердость обеих чугунных соприкасающихся друг с другом поверхностей одинакова (опыты производились под нагрузкой 23,52 кг/мм² [55];

15) паровозные клапанные кольца с твердостью меньше 14 по Бринелю снашиваются очень быстро; при разнице в твердости между клапанным кольцом и коробкой в 10 единиц износ был наименьшим и равнялся только половине того износа, который получался при одинаковой твердости кольца и коробки [56].

Сопротивление коррозии

Способность чугуна сопротивляться коррозии за последние годы изучалась усиленно [58], однако вопрос этот настолько сложен, что более или менее исчерпывающих данных еще не имеется.

Вообще говоря, обыкновенный серый чугун хорошо сопротивляется коррозии в почве; известны случаи, когда водопроводные трубы находились в земле более 100 лет. Чугун широко применяется также в нефтяной, газовой и химической промышленности.

Чугун может сопротивляться действию не слишком горячей концентрированной серной кислоты (свыше 60° Бомэ), однако разведенная серная кислота сильно его разъедает. Олеум, и дымящая серная кислота, также разъедает серый чугун, при этом крупнозернистый чугун растворяется. Азотная кислота действует на серый чугун очень сильно. Довольно хорошо сопротивляется действию азотной кислоты высококремнистый чугун, еще лучше, чугун или сталь с 14—30% Cr.

Раствор едких щелочей и щелочных солей в некоторых случаях заметного действия на серый чугун не оказывают. По этой причине чугун широко применяется там, где приходится иметь дело с этими материалами.

Причины и теория коррозии. Ввиду сложности вопроса не

ких общих правил дать невозможно. Коррозия может быть вызвана, во-первых, окислением или химическим действием корродирующих агентов, вроде кислот или щелочей, или электролизом, а также комбинацией двух или большего числа причин. Во-вторых, нужно иметь в виду, что каждый случай коррозии индивидуален. Температура, строение и состав чугуна, вещества, действующие на чугун, и целый ряд других факторов оказывают влияние на скорость и на глубину коррозии. Например, коррозия чугунных водопроводных труб зависит не только от состава материала самих труб, от состава протекающей через них воды и от состава почвы, но и от блуждающих электрических токов. Благодаря целому ряду работ по изучению коррозии чугуна и стали оказалось возможным выявить ряд фактов, проливающих свет на причины коррозии, о чем говорится ниже. С химической точки зрения коррозия чугуна объясняется действием влаги и свободного кислорода с образованием закиси и окиси железа. Там, где вода тесно соприкасается с чугуном, как в водопроводных трубах, содержащийся в воде свободный кислород обыкновенно служит главной причиной коррозии.

Так как чугун растворим в кислотах и до некоторой степени в щелочах, то таковые также вызывают коррозию. Соли, как например бикарбонаты, хлориды, сульфаты и нитраты также действуют на чугун, однако более или менее сильная коррозия начинается только в присутствии свободного кислорода. Разрушение чугуна, долгое время находившегося во влажной окислительной атмосфере, часто ускоряется при удалении продуктов распада паром, абразивами, растворами кислот и щелочей и их солями [59].

Часто коррозия чугуна обуславливается причинами электролитического характера. Известны два рода электролиза: первый из них является результатом извне возбуждаемого электрического тока, идущего от металла по проводящей цепи. Это тот именно вид электролиза, который разъедает чугунные трубы, проложенные вблизи линий трамвая и т. п. Ко второму роду относится автоэлектролиз чисто электрохимического характера, являющийся результатом электродвижущей силы, образующейся на поверхности металла вследствие разности потенциалов.

Причиной этой разности потенциалов служит различие в природе составных частей металла, образующих гальванические пары на поверхности металла. К числу таких пар относятся графит—железо, железо—окись железа и т. д. Различие в содержании кислорода в окружающей среде также влечет за собой возникновение разности потенциалов. В трубопроводах обнаружены как короткие цепи тока, идущего от грунта или поврежденного места на трубе к примыкающей неповрежденной поверхности трубы, так и длинные цепи вдоль трубопроводов, например от болотистой низины к вышерасположенному грунту, где кислород имеется в изобилии. Старые чугунные водопроводы, пролежавшие в земле больше 100 лет и недавно вырытые, со-

стояли только из графита, цементованного окисью железа [61]. Тем не менее трубы эти еще могли выдерживать давление в 40 кг.

Химическая коррозия водопроводных труб часто ускоряется действием блуждающих токов. Часто также коррозия начинается в результате совместного действия химических и электрохимических сил.

Сравнение сопротивления чугуна и стали. Сравнительная оценка чугуна и стали в отношении их коррозии в естественных условиях (почва и вода) дается Спеллером [62] следующей формы: ржавчина часто держится лучше на неровной поверхности чугуна, чем на стали или железе, и в атмосферных условиях образует мелкозернистую защитную пленку, наличием которой, вероятно, и объясняется сравнительно более длительный срок службы чугуна на воздухе или в сухой и влажной среде. Однако при непрерывном нахождении во влажной среде образующаяся ржавчина имеет открытое рыхлое строение и почти никакого защитного действия не оказывает.

Сравнительные испытания показывают, что в корродирующих почвах как чугун, так и сталь разрушаются примерно одинаково, но чугун обыкновенно служит дольше благодаря большей толщине, и иногда трубы продолжают служить еще многие годы в результате графитового разложения, хотя при этом значительно падает их прочность и вязкость. Долговечность чугуна и стали может быть принята приблизительно пропорциональной толщине металла.

Далее Спеллер приводит мнение Френда и Мершелла [Friend, и Marsnall]: «чугун более стоек на воздухе или при переменном увлажнении и высушивании. В морской воде чугун, повидимому, сохраняется несколько лучше, но при постоянном нахождении в пресной воде существенной разницы не получается».

Результаты испытаний, проведенных Бюро стандартов США (Bureau of Standards), показывают, что после десяти лет службы скорость коррозии всех железоуглеродистых сплавов становится примерно одинаковой. Так как чугун имеет обыкновенно толщину, большую по сравнению со стальными деталями, то вполне понятно, что он более стоек в качестве материала для водо- и газопроводов. Немаловажное значение имеет также действие графитового остатка, закупоривающего неплотности материала в случае резкой электролитической или другого рода коррозии.

Строение. Опыты показывают, что литейная корка почти никаким защитным действием против коррозии не обладает. Что выигрывается в смысле предохранения от коррозии, то теряется вследствие усиления склонности к гальванической местной коррозии. Что касается влияния величины зерна, то это настолько тесно связано с влиянием состава, что очень трудно в этом отношении сказать что-нибудь определенное. Работы Барденхейера и Цейена [Bardenheuer, Zeyen, 63] показывают, что в разведенных неокисляющих кислотах—соляной, серной и уксусной—увеличение размеров графитовых включений замедляет скорость коррозии при условии, что количество графита ос-

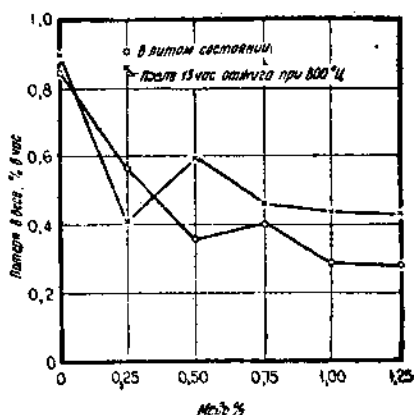
тается одинаковым и что образцы никаких пороков не имеют. Это, без сомнения, подтверждает электролитический характер данного вида коррозии, так как чем крупнее частицы графита, тем меньше поверхность, образующая элементы. Вообще, в мелкозернистом чугуна графита меньше, а следовательно, и элементов образуется меньше. Наряду с этим маловероятно получение пористости между зёрнами или вдоль графитовых жилок. Поэтому сопротивление коррозии вообще выше, чем принято считать.

Малоуглеродистый, высококремнистый чугун, с добавками элементов, препятствующих графитизации, как например хрома, применяется с успехом. В последнее время предложен малокремнистый щелочеупорный чугун с малым содержанием фосфора и серы. Состав этого чугуна следующий: 0,60—0,75% Si, 0,15—0,75% Mn, 0,08—0,15% P и 3,40—3,55% S_{общ.}

Пороки поверхности. Очень важно, чтобы поверхность чугуна, подвергающегося коррозии, была непрерывной (сплошной), без всяких пороков, вроде включений шлака, песка и т. д., могущих служить центрами коррозии. Металл должен быть вполне здоровым, без трещин, пор и раковин.

Влияние температуры. Коррозия усиливается по мере повышения температуры, так как почти все химические вещества становятся более активными при нагревании и поэтому сильнее действуют на чугун. Точно так же рост отливки служит причиной раскрытия трещинок, облегчающих доступ корродирующих жидкостей и газов внутрь металла.

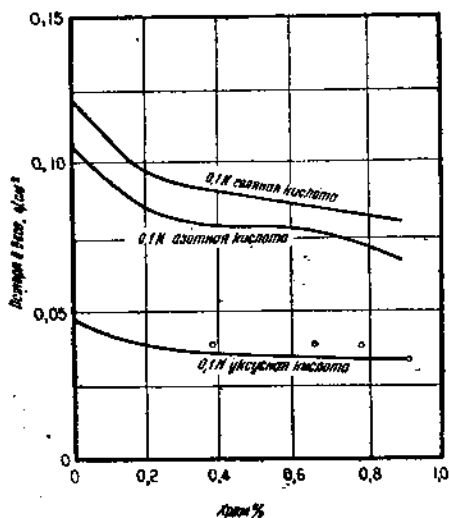
Медь. Относительно влияния меди на сопротивление чугуна коррозии мнения расходятся. Некоторые авторы указывают, что медь увеличивает сопротивление коррозии в разведенных кислотах, другие утверждают противное. Экспериментальные работы и практика показывают, что медь при содержании примерно до 1% оказывает определенно положительное влияние на сопротивление коррозии в некоторых средах. Михайлов [64] указывает, что медь в сильной степени улучшает антикоррозийные свойства чугуна в разведенных кислотах, что подтверждает и Денеке [Denecke, 65] (фиг. 45). Чугун с содержанием от 0,5 до 1,0% Cu с успехом применялся, например для трубопроводов на нефтеочистительных заводах. Медистый чугун лучше сопротивляется атмосферной коррозии по сравнению с обыкновенным углеродистым чугуном



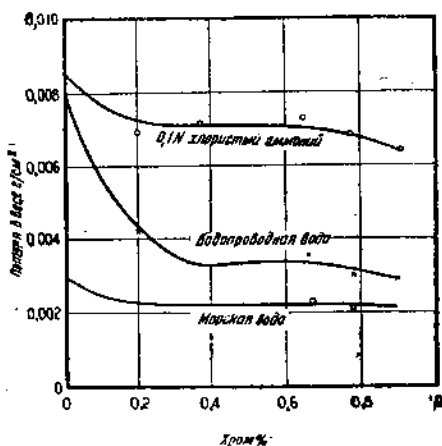
Фиг. 45. Влияние меди на коррозию чугуна в разведенной соляной кислоте (W. Denecke)

Хром. Небольшие количества хрома, от 0,2 до 1,0%, заметно увеличивают сопротивление чугуна коррозии в некоторых средах. Дональдсон [Donaldson, 66] указывает, что хром особенно хорошо предупреждает коррозию в морской воде и в слабых кислотах (фиг. 46 и 47).

Данные Дональдсона подтверждаются работами Кэтчке и Пивоварского [Koetzschke, Piwowarsky, 67]. Последние нашли, что при содержании хрома свыше 0,9% сопротивление чугуна коррозии заметно повышается. Это влияние, графически изображенное на фиг. 48 и 49, объясняется наличием стабильных двойных карбидов, образуемых хромом.



Фиг. 46. Влияние хрома на коррозию чугуна в различных средах (J. W. Donaldson)



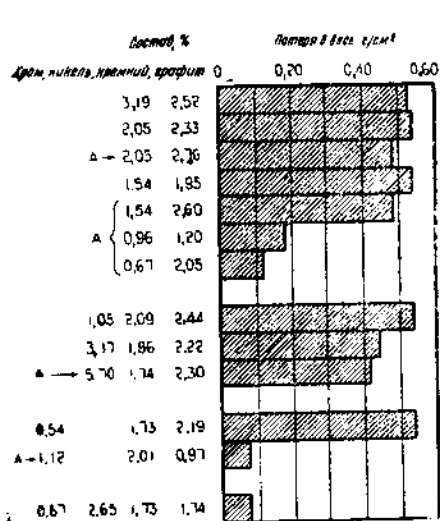
Фиг. 47. Влияние хрома на коррозию чугуна в различных средах (J. W. Donaldson)

Никель. Небольшое содержание никеля, повидимому, очень мало влияет на сопротивление коррозии. При содержании от 1 до 3,5% никель давал очень хорошие результаты в смысле повышения сопротивления чугуна коррозии едкими щелочами.

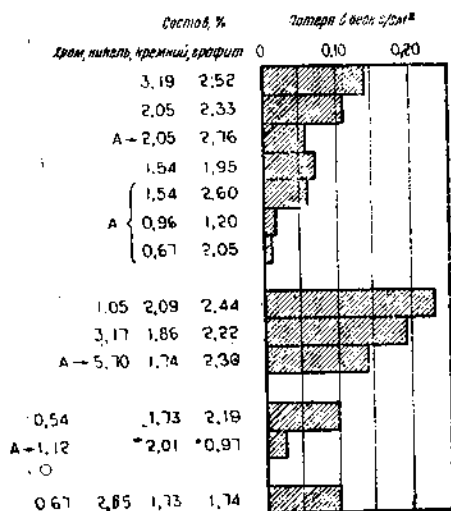
Никель и хром. Опыт показывает, что небольшие добавки никеля и хрома, от 1,5 до 2,5 частей никеля на 1 часть хрома, задерживают коррозию. Часто применяются чугунные фитинги с содержанием 0,50% Ni и 0,25% Cr, причем даже в таких незначительных количествах совместное присутствие никеля и хрома, повидимому, улучшает антикоррозийные свойства чугуна. Трубы в горячих частях трубопроводов для сернистого газа на химических заводах часто делают из чугуна с несколько большим содержанием этих добавок, а именно: от 0,60 до 1,25% Ni и 0,30—0,60% Cr.

Молибден. Данные относительно влияния молибдена на чугуны почти отсутствуют, во всяком случае можно считать, что если молибден и оказывает какое-либо влияние, то самое незначительное.

Кремний. Как сказано выше, чугуны с плотным строением лучше сопротивляются коррозии, чем чугуны с более рыхлой структурой. По этой причине часто применяются чугуны с содержанием кремния менее 0,85%. При увеличении содержания кремния от 1,0 до 3,0% сопротивление коррозии обыкновенно ослабевает.



Фиг. 48. Коррозия разных чугунов после трехдневного пребывания в N/5 соляной кислоте (Koetzschke, Piwowarsky)



Фиг. 49. Коррозия чугунов (по фиг. 48) после шестидневного пребывания в N/5 соляной кислоте (Koetzschke, Piwowarsky)

Влияние абразивов. Коррозия чугуна часто ускоряется под действием эрозии, вызываемой протекающими жидкостями и газами и под действием истирания абразивными частицами. Поэтому нередко можно задержать коррозию применением чугунов, достаточно твердых для противодействия «внешнему» разъедающему действию. Особенное значение это имеет для нефтеочистительных заводов и рудников.

Специальные антикоррозийные чугуны. Чугуны, особенно отличающиеся своими антикоррозийными свойствами, могут быть разбиты на три класса: 1) высококремнистые, 2) высокохромистые и 3) высоконикелевые.

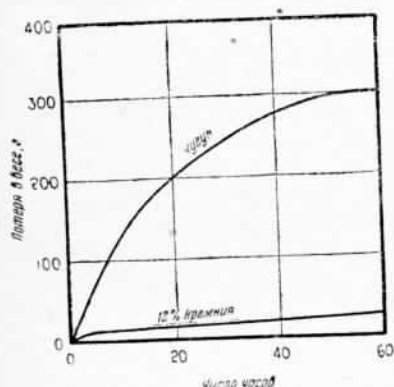
1. **Высококремнистый чугун.** При содержании кремния от 11 до 17% чугун ведет себя как антикоррозийный сплав, особенно хорошие результаты получаются при содержании кремния от 14,5 до 17%.

С успехом применяются в особо тяжелых условиях коррозии чугуны с 15% Si. Эти чугуны хорошо сопротивляются действию

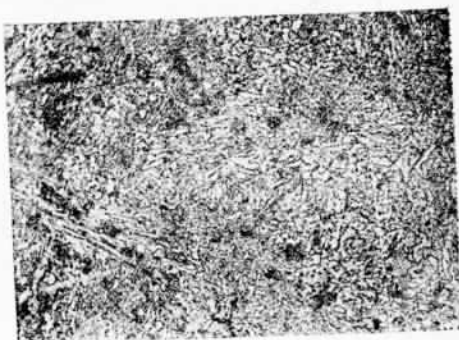
всех кислот за исключением плавиковой [70] и горячей концентрированной соляной кислоты (фиг. 50).

Недостатком этих чугунов служит очень большая твердость и хрупкость, исключающие возможность обработки их на станке. Такие чугуны можно обрабатывать только шлифовкой. Чугуны эти находят под разными марками широкое применение в химической и родственных с ней областях промышленности, особенно для заводского оборудования, работающего с корродирующими жидкостями и газами [71].

2. Высокохромистый чугун. При содержании от 15 до 30% хром образует на поверхности чугуна защитную пленку, особенно стойкую против действия серы и кислот. На фиг. 51 показана микроструктура чугуна с 15% Cr.



Фиг. 50. Влияние 12% Si на коррозию чугуна в кипящей серной кислоте (W. Denecke)



Фиг. 51. Микроструктура чугуна с 15% Cr (Union Carbide & Carbon Research Labs)

Образцы с различным содержанием хрома выдерживались в течение 528 час. при 190° в атмосфере, состоявшей из смеси углекислого газа, сернистого газа, водяного пара и воздуха; результаты показали, что на поверхности чугуна образуется коррозионноустойчивая пленка, как видно из таблицы 39.

Таблица 39

Хром, %	Потеря в весе за 528 час. г/см ²
0	0,0242
11	0,0080
14	0,0071

Некоторые из этих сплавов содержат значительное количество углерода и могут быть отнесены как к чугунам, так и к сталям. Сплав, содержащий 24% Cr, 1,5% Si и 2,00% C, особенно хорошо сопротивляется коррозии, хотя точных данных в этом отношении не имеется [72]. Очень стойкими являются чугуны с 34,2% Cr, 1,2% Si и 2,3% C [73]. Сплавы эти не чувствительны к

Сопротивление высокохромистых чугунов химической коррозии

(„Metals and Alloys,“ февраль 1933)

Корродирующая среда	Температура °C	Сопротивление коррозии при содержании углерода, %	
		1,1	2,3
Азотная кислота:	20	Совершенное	Совершенное
7%, уд. в. 1,04	Кипящая	"	"
7%, " " 1,04	20	"	"
37%, " " 1,23	Кипящая	Хорошее	Хорошее
37%, " " 1,23	20	Совершенное	Совершенное
66%, " " 1,40	Кипящая	Хорошее	Хорошее
66%, " " 1,40	20	"	"
Концентрированная дыма- щая, уд. в. 1,52	20	"	"
Концентрированная дыма- щая, уд. в. 1,52	40	Отсутствует	Отсутствует
Смесь кислот в % по весу:			
30% концент.серной кислоты			
+5% концент. азотной "	50	Совершенное	Совершенное
+65% воды	20	"	Хорошее
Сернистая кислота			
насыщ. водн. раствор . . .	20	"	Совершенное
Фосфорная кислота			
10%, уд. в. 1,05	Кипящая	"	Слабое
45%, " 1,30	"	Слабое	Слабое
80%, " 1,64	"	"	"
Уксусная кислота			
10%, уд. в. 1,01	Кипящая	Совершенное	Совершенное
80%, " 1,07	"	"	"
100%, " 1,05	"	"	"
Молочная кислота 1,5% . .	"	"	"
Едкий натр			
водный раствор 15%, уд. в.	50	"	"
1,16	Кипящая	Отсутствует	Отсутствует
50%, уд. в. 1,53	"	Совершенное	Совершенное
Азотнокислый аммоний			
водный раствор 50% . . .	"	"	"
Сернистый аммоний			
водный раствор 50% . . .	"	"	"
Кислый сернистокислый			
кальций			
при давлении 12—15 ат . .	Около 150	Отсутствует	Отсутствует
при давлении 4—6 ат . . .	90	Совершенное	Совершенное
Белильная известь, насы- щенная на холоду			
водный раствор	40	Хорошее	Хорошее
Хлорное железо			
водный раствор 30% . . .	20	Отсутствует	Отсутствует
Азотнокислый калий			
водный раствор 25% . . .	Кипящая	Совершенное	Совершенное
Сернистый калий			
водный раствор 50% . . .	"	"	"
Хлористый цинк			
водный раствор, уд. в. 1,20	"	Отсутствует	Отсутствует
уд. в. 1,90	"	"	"

влияниям атмосферы и целого ряда химикалиев, как показывает табл. 40. В основу сравнительной оценки сопротивления различных сплавов коррозии в табл. 40 положена потеря в весе, причем степень сопротивления выражается следующими обозначениями:

При потере в весе в г/м ² . час	Сопротивление коррозии
Меньше 0,1	Совершенное
От 0,1 до 1	Хорошее
„ 1 „ 3	Удовлетворительное
„ 3 „ 10	Слабое
Свыше 10	Отсутствует

3. Высоконикелевый чугун. Чугуны с большим содержанием никеля имеют аустенитовое строение и исключительно хорошо сопротивляются коррозии. Вместе с тем они легко обрабатываются. Чугун с содержанием 15% Ni, 2,5% Cr, 6% Si и 1% Mn хорошо сопротивляется действию целого ряда кислот и щелочей. Этот чугун рекомендуется для работы с соляной, серной и фосфорной кислотами, но дает также хорошие результаты и при действии едких щелочей (табл. 41).

Таблица 41

Коррозия никелевого чугуна в едвой щелочи плотностью в 180° по Twaddell при температуре кипения

№	Общее содержание углерода, %	Кремний %	Никель %	Хром %	Потеря в весе, мг/дм ² в день
1	3,66	0,97	Нет	Нет	366
2	3,03	1,11	3,77	„	235
3	2,88	0,75	6,53	„	247
4	2,73	0,60	16,66	„	152
5	2,67	0,65	19,55	1,80	31
6	2,13	0,51	22,24	Нет	17
7	2,27	0,61	28,90	„	2

Рекомендуемые составы в %

Марки	Углерод общий	Кремний	Никель	Хром	Медь
Ni-Resist без меди . .	2,80—3,10	0,80—1,40	18—22	2—4	—
Нормальный Ni-Resist	2,80—3,10	1,25—2,00	12—15	2—35	5—7

Для отбеливающих установок рекомендуется аустенитовый чугун без меди следующего состава: 2,70—3,10% C_{общ.}, 0,80—1,15% Si, 18—22% Ni, 2—3,50% Cr. Этот чугун также рекомен-

дуются для едких щелочей, если присутствие в чугуне меди нежелательно. Фиг. 52 показывает разницу в сопротивлении коррозии между обыкновенным и аустенитовым чугунами.

Табл. 42 и 43 подтверждают, насколько хорошо сопротивляется коррозии аустенитовый чугун.

Таблица 42

Сопротивления коррозии (International Nickel Co)

Реагент	Аустенитовый чугун	Обыкновенный чугун	Латунь	Бронза
5%-ная серная кислота	1	475	1,12	1,08
холодная	1	195	0,15	0,15
10%-ная серная кислота при 100°	1	1,95	—	0,08
78%-ная серная кислота при 100°	1	185	13,0	24,0
5%-ная соляная кислота	1	400	2,75	2,22
25%-ная уксусная	1	2,9	0,27	0,08
Оп. окисление соляным раствором	1	5,0	0,5	2,15
Морская вода	1			

Таблица 43

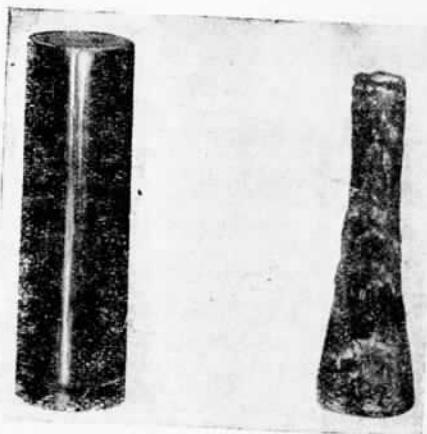
Испытания на коррозию (International Nickel Co)

Реагент	Потеря в весе, мг/дм ² в день		
	Ni-Resist	обыкновенный чугун	отношение обыкновенного чугуна к Ni-Resist
Атмосфера	Ржавчина поверхность	Ржавчина сплошная	
" 30 дней	9,5	59,7	6
" 90 "	7,9	63,5	8
" 15 "	3,5	35,0	10
Опрыскивание водой вертикально	6,6	207,5	32
Опрыскивание водой горизонтально	17,6	244	14
Аэрированная водопроводная вода	7,8	67,2	9
3%-ный соляной раствор	50,0	190	4
12,5%-ный раствор перебродившей патоки	10,0	360	36
Котельная вода при 95°	110	660	6
Сернистое железо	17 000	32 000	2
5%-ная серная кислота аэрированная	358	30 000	85
5%-ная соляная кислота аэрированная	507	26 665	50
10%-ная соляная кислота аэрированная	598	29 475	50
20%-ная соляная кислота аэрированная	1111	33 270	30
Горячая едкая щелочь	30,0	430	8

Для того чтобы чугун мог выдерживать действие высоких температур необходимо, чтобы он был устойчивым против роста и окисления.

Вопрос о росте серого чугуна исчерпывающе разработан Болтоном и Борнштейном [74] и в отношении обыкновенного чугуна рассмотрен выше в главе «Рост чугуна».

Обыкновенные чугуны вполне стойки при температурах ниже 340° . При температурах выше 340° чугун начинает расти. Чугуны, вполне стойкие в обычных условиях, обнаруживают рост даже при температурах ниже 340° в присутствии перегретого пара высокого давления. При температурах от 340 до 370° чугун растет не только вследствие чередования расширения и сжатия и проникания корродирующих газов, но и вследствие графитизации. Особенно сильное увеличение объема чугуна имеет место в результате распада перлита на феррит и графит, что происходит при температурах свыше 480° , при этом соответственно увеличивается и скорость роста. При температурах свыше 730° чугун растет очень быстро в результате превращения перлитно-ферритовой структуры в аустенит и усиления действия других факторов, способствующих росту. Известны случаи, когда объем отливок возрастал на 50% по сравнению с первоначальным объемом, причем не только искажалась форма отливок (фиг. 53), но они приобретали чрезвычайную хрупкость.

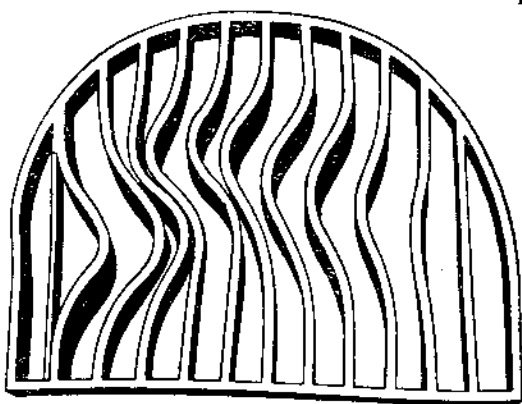


Фиг. 52. Аустенитовый (слева) и обыкновенный после выдержки в корродирующей среде (International Nickel Co)

В настоящее время имеются легированные чугуны, способные выдерживать нагрев до 980° .

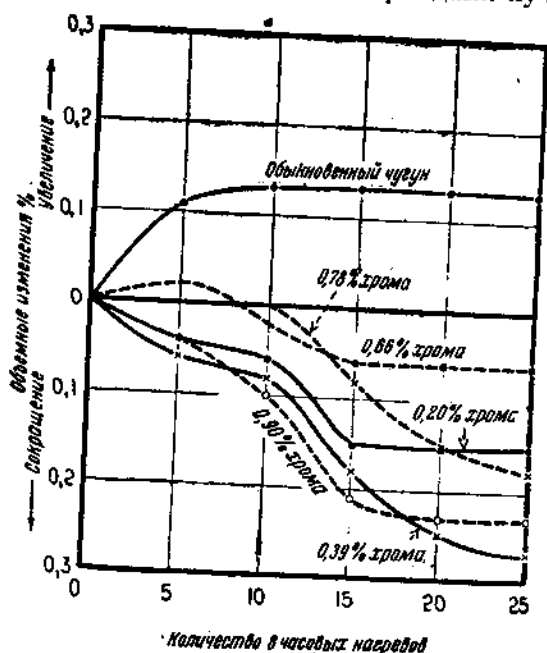
Теории роста серого чугуна. Среди многочисленных работ по вопросу о причинах роста чугуна заслуживают внимания две теории. Согласно первой из них, рост чугуна вызывается химическими реакциями, в результате которых образуются составляющие, более объемистые по сравнению с первоначальными. Руган и Керпентер [Rugan, Carpenter, 75, 76], считают, что причиной роста служит прежде всего проникновение печных газов внутрь металла по жилкам графита и вызываемое ими окисление составных частей чугуна, особенно кремния. Продукты окисления силицида железа — окислы железа и кремния — очень объемисты и, следовательно, в сильной степени увеличивают объем чугуна.

Дональдсон [77] полагает, что причиной роста служит, в первую очередь, распад карбидов с последующим окислением продуктов распада. Согласно второй теории, рост представляет собой явление чисто механического порядка, обусловливаемое образованием мелких трещинок в результате частично необратимых процессов расширения. Кикута [Kikuta, 78], Бенедикс и Лофквист [Benedicks Lofquist, 79] и другие также присоединяются к этому мнению.



Фиг. 53. Искривление колосниковой решетки вследствие роста после продолжительного нагрева (J. E. Hurst)

Влияние структуры и состава. Независимо от причины, вызывающей рост чугуна, вполне установлено, что мелкозернистые чугуны с более стабильными карбидами лучше сопротивляются росту,



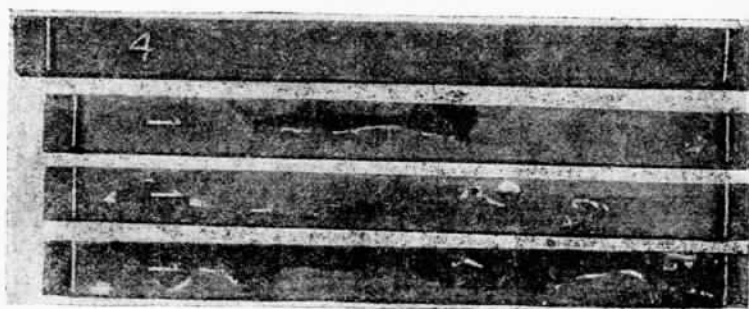
Фиг. 54. Влияние хрома на рост чугуна при 550° (J. W. Donaldson)

чем чугуны с крупнозернистым строением; твердые малоуглеродистые чугуны поэтому более пригодны для работы при высоких температурах, чем мягкие чугуны. Малокремнистый или белый легированный чугун лучше сопротивляется росту, чем серый, так как он труднее графитизируется.

Влияние хрома на рост. Так как чугуны с более стабильными карбидами не склонны к росту, то все добавки, способствующие стабилизации карбидов, вместе с тем задерживают рост чугуна.

На этом основании хром, как хороший стабилизатор карбидов, широко применяется в производстве жароупорных чугунов. Вместе с тем хром уменьшает и потери проч-

ности, имеющие место в условиях высоких температур. Оптимальное количество хрома, требующееся для получения нужного результата, зависит от того, насколько данный чугун способен образовать карбиды. Для малокремнистого чугуна с малым содержанием общего углерода хрома потребуется меньше, чем для чугуна мягкого. Кроме того величина добавки хрома зависит от рабочей температуры, для которой предназначается данный чугун. Исследования Дональдсона [80] показывают, что в некоторых чугунах хром в количестве от 0,20 до 0,39% не только предупреждает рост при температурах до 550°, но вызывает даже незначительное уменьшение объема (фиг. 54). Последние работы [81] показывают, что для предупреждения роста некоторых чугунов при температурах до 600° достаточной добавкой является 0,80% и даже меньше (см. фиг. 16).



Фиг. 55. Влияние хрома на рост чугунных брусков после повторных нагревов при 897° (Sherwin Killey)

В общем случае, 1,50% Cr вполне достаточно для предупреждения роста чугуна при нагреве до 870° [82], тем не менее рекомендуется добавлять хрома несколько больше в те отливки, которые должны выдерживать не только нагрев, но и истирание.

Влияние 3,28% Cr на чугун показано на фиг. 55.

При температурах до 980° чугун должен быть не только жароупорным, но и стойким против окисления, поэтому в такие чугуны хром добавляется в количестве от 14 до 34%.

Чугун, содержащий 24% Cr, практически не обнаруживает роста и хорошо сопротивляется окислению. Такой чугун обычно плавится в электропечи; состав его следующий: 24% Cr, 1,50% Si, 2,00% C.

Валента [Valenta, 84] производил сравнительные испытания на жароупорность двух чугунов, хромистого и обыкновенного, нагревая их в течение 24 час. при 800°. Хромистый чугун содержал 1,43% C, 2,30% Si и 27,91% Cr. Обыкновенный чугун увеличился при этом в длине на 1,243%, тогда как рост хромистого чугуна в пределах экспериментальной точности невозможно было измерить. На этом основании Валента полагает, что такие сплавы, не теряя

своих свойств жароупорности, становятся более вязкими и способными сопротивляться удару.

В исследованных недавно чугунах с 34% Сг рост при нагревании также не был обнаружен. Эти чугуны хорошо сопротивляются образованию окалины и не окисляются даже при нагреве до 1100°. Больше того, чугун этот не испытывает никаких превращений, и даже частая смена температур не влечет за собой деформаций отливки [85].

Влияние кремния на рост. В тех количествах, в которых кремний содержится обыкновенно в чугуне, он благоприятствует графитизации и, следовательно, способствует росту; при очень незначительном, или наоборот, при очень большом содержании кремния рост задерживается.

Малокремнистый чугун, так называемый перлитовый, до некоторой степени способен сопротивляться действию высоких температур, как чугун, структура которого состоит сплошь из перлита и мелкого равномерно распределенного графита. Особенностью этого чугуна служит то, что в условиях нормального охлаждения он застывает, как белый чугун, а при заливке в подогретые формы он получается серым. Приблизительный химический состав этого чугуна следующий: 3,25% С_{общ.}, 1,11% Si, 0,79% Mn, 0,40% P и 0,15% S. Для более толстостенного литья шихту берут более твердую (2,90% C, 0,9% Si).

Таблица 44
Рост чугуна

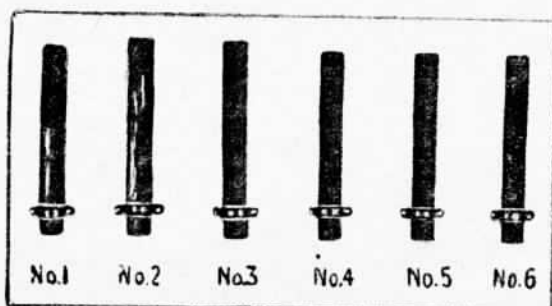
Состав, ‰		Рост, ‰
углерод	кремний	
2,1	3,7	0,923
2,1	5,3	0,571
1,95	5,6	0,247
2,5	6,1	0,011

Наряду с жароупорностью и неокисляемостью этот чугун обладает большей прочностью, сопротивлением удару, обрабатываемостью и умеренной твердостью. Перлитовая структура может быть получена за счет перегрева чугуна без подогрева формы.

Британским научным о-вом изучения чугуна (British Cast Iron Research Association) недавно был получен чугун с 6—8% Si, устойчивость которого против роста зависит: 1) от сплошного ферритового строения, устраняющего возможность распада карбида, 2) от добавок легирующих элементов, вызывающих повышение температуры превращения и тем самым предупреждающих образование рыхлой структуры с последующим окислением в результате изменения объема, 3) от образования мелкозернистого «переохлажденного» графита, 4) от плотного и прочного строения металлической основы.

В табл. 44 приведены данные о росте различных подобных чугунов после 10-часового нагрева при температурах не выше 1000°. Чугун означенного типа рекомендуется для рабочих температур от 700 до 895°. В тех случаях, однако, когда чугун подвергается напряжениям в холодном состоянии, полезно к чугуну с таким же содержанием кремния добавлять легирующие элементы для улучшения вязкости.

Влияние нагрева при 1000° на свойства различных сталей и чугунов в течение семи получасовых периодов показано на фиг. 56.



Фиг. 56. Образцы стали и разных чугунов после семи получасовых нагревов при 1000°

№ 1. Сталь. Роста нет, но значительная чешуйчатость.

№ 2. Чугун (1,7 % Si); рост 16 %.

№ 3. Чугун (3,7 % Si). Малая чешуйчатость; рост 12 %.

№ 4. Никель-хромовый чугун (5,4 % Si). Легкое поверхностное окисление; рост 5 %.

№ 5. Силецистый чугун (7,9 % Si). Очень легкое поверхностное окисление; рост 2,7 %.

№ 6. Никросилал (6% Si, 1,7% Ni, 3% Cr). Поверхность не тронута; рост 1,9 %.

Влияние никеля и хрома на рост. Отливки с хорошей устойчивостью против роста могут быть получены добавкой хрома в количестве, достаточном для стабилизации карбидов, и никеля для обеспечения обрабатываемости. Типичным содержанием никеля и хрома в этом чугуне является 1,50 % Ni и 1,00 % Cr.

Мерой распада карбидов и соответственно этому мерой роста чугуна служит изменение в содержании связанного углерода [87] (табл. 45).

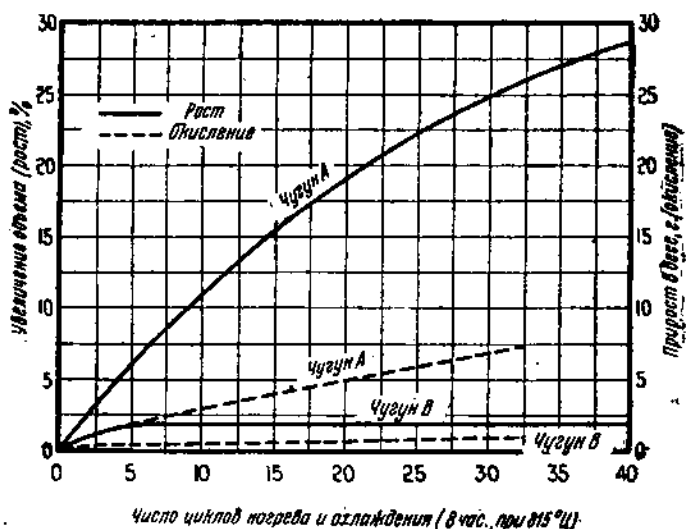
Таблица 45
Влияние никеля и хрома на стабильность карбида

Чугун	Состав, %				Связанный углерод, %		
	общий углерод	кремний	никель	хром	в отливке	после нагрева в течение 90 час. при 650°	в % от начального
Обыкновенный	3,10	1,69	—	—	0,75	0,09	11,5
Никельхромистый	3,15	1,76	1,13	0,45	0,90	0,41	45,5

Совершенно исключительные результаты в отношении жароупорности дают составы аустенитовых чугунов (в %):

	Ni	Si	Cr	C	Cu
№ 1 (88)	14	2	4	1,25	6
№ 2 (89)	18	6	2	1,00	—

Так как чугуны имеют сами по себе аустенитовое строение, то они не испытывают структурных превращений и связанных с этим изменений объема при повторных нагревах и, следовательно, более устойчивы в смысле роста, чем обыкновенный чугун. Как показывает фиг. 57, они не способны окисляться, особенно при температурах от 650 до 815°.



Фиг. 57. Диаграмма окисления и роста обыкновенных А и аустенитового В чугунов (International Nickel Co)

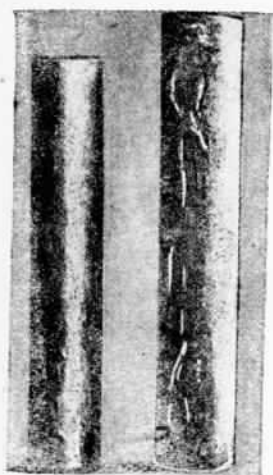
	А		В	
C _{общ}	3,26	3,04	—	14,31
Si	2,02	1,62	—	5,37
			—	3,23

Фиг. 58 показывает для сравнения относительный рост, окисляемость и коробление обыкновенного и легированного чугунов после повторных нагревов. Сплавы эти могут быть получены как в вагранке, так и в электропечи и в тигле. Вследствие своей жароупорности, легкоотливаемости, хорошей обрабатываемости и свариваемости чугуны эти нашли широкое применение для таких отливок, как клапаны, фитинги, топочные части, детали котлов и печей и пр.

Влияние молибдена, вольфрама, ванадия и марганца на рост чугуна. Можно сказать с уверенностью, что всякий легирующий

элемент, который способен стабилизировать карбиды, способствует и развитию свойств жароупорности. Поэтому очень вероятно, что вольфрам, молибден, ванадий и марганец должны оказывать благотворное влияние на жароупорность, хотя окончательных данных по этому вопросу еще не имеется.

Огневые трещины (fire cracks). В тех случаях, когда только поверхность чугуновой отливки подвержена действию температуры выше красного каления, она начинает расти, хотя незначительно, но непрерывно. После охлаждения и повторного нагревания на поверхности образуются мелкие трещинки, известные под названием «огневых трещин» (фиг. 59). Эти трещины облегчают доступ газам и другим корродирующим веществам внутрь металла, как например в тормозных барабанах, в металлических формах и т. д. Обыкновенно трещины эти образуются вследствие распада карбидов, а потому добавки, способные стабилизировать карбиды, как например хром или молибден, задерживают образование трещин.



Фиг. 58. Аустенитовый (слева) и обыкновенный чугуны (справа) после повторных нагревов (International Nickel Co)

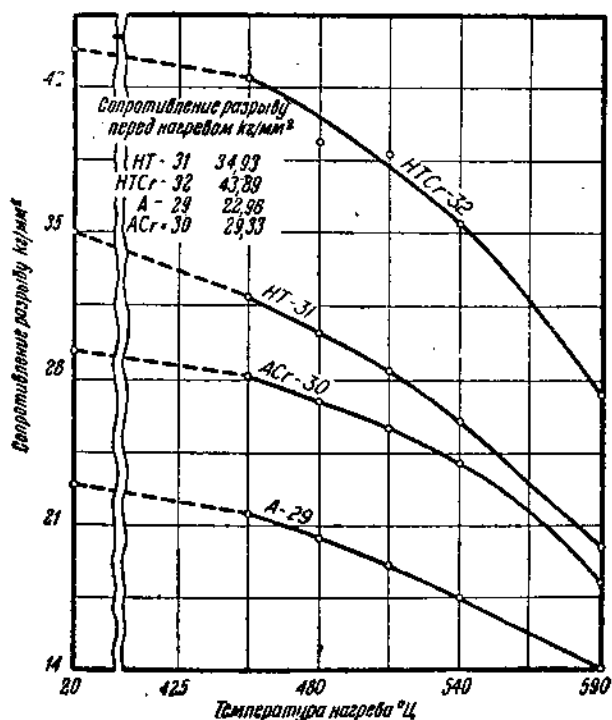


Фиг. 59. Характерные трещины на поверхности чугуновой изложницы (J. E. Hurst)

Влияние температуры на прочность. При повышении температуры прочность чугуна падает и в большинстве случаев при охлаждении не восстанавливается. Такое ослабление материала имеет очень серьезное значение и исключает возможность применения обыкновенного чугуна для работы при высоких температурах. Крепкий, плотнозернистый чугун меньше подвержен ослабляющему влиянию высоких температур, но тем не менее, для сохранения прочности принято применять хром или молибден с никелем или без него. Влияние этих добавок показано на фиг. 60 [90]. Химический состав этих чугунов следующий (табл. 46).

Марка чугуна	Химический состав, %								
	общий углерод	связанный углерод	графит	кремний	сера	фосфор	марганец	никель	хром
HT-31	2,96	0,73	2,23	2,53	0,113	0,06	0,78	0,96	0,02
HTCr-32	2,67	0,79	1,88	2,39	0,090	0,07	0,67	0,76	0,45
A-29	3,63	0,73	2,90	1,15	0,091	0,17	0,54	0,03	0,03
ACr-30	3,46	0,87	2,59	1,36	0,085	0,39	0,68	0,01	0,54

Чугун с 24% Сг оказывается очень прочным при высоком нагреве, при 780° сопротивление разрыву оказалось равным 10,29 кг/мм². Уже упоминавшийся выше чугун с 34% Сг даже повышает прочность при нагреве. Как указано ниже, сопротивление разрыву, равное при температуре помещения 40,95 кг/мм², увеличилось до 45,92 кг/мм² при нагреве до 500° и при дальнейшем нагреве до 600° упало до 28,35 кг/мм².



Фиг. 60. Временное сопротивление чугуна при высоких температурах (Mac Pherran a. Kreuger)

Из этого следует, что максимум прочности лежит в интервале между температурой помещения и 600°.

Температура, °C

20
500
600
800
900
1000

Временное сопротивление разрыву, кг/мм²

40,95
45,92
28,35
10,85
6,58
4,48

Окисление. При нагреве до температуры выше красного каления чугуны окисляются с поверхности, причем иногда пленка окислов делается настолько толстой, что отстает в виде окали-



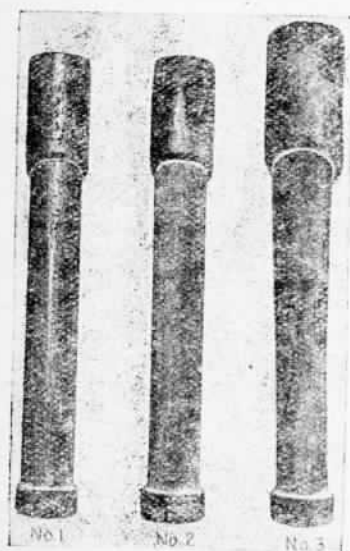
Фиг. 61. Топочные листы после трех нагревов при температуре в 800°. Травлено. $\times 75$ (Norbury a. Morgan)¹

ны. В результате чугун быстро разрушается, особенно в присутствии избытка кислорода или печных газов (фиг. 61).

Те же самые причины, от которых зависит задержка роста, остаются в силе и в отношении предупреждения окисления. До некоторой степени задерживает окисление плотностерное строение и небольшие добавки легирующих элементов. Часто для увеличения сопротивляемости окислению при температурах до 980° применяют никельхромомедные сплавы. К числу таких жароупорных чугунов, хорошо сопротивляющихся окислению, относится чугун с 14—40% Cr. Особенно хорошо сопротивляется окислению чугун с 24—34% Cr.

Иллюстрацией жароупорности чугуна служит фиг. 62.

Применение. Новейшие жароупорные чугуны находят широкое применение в целом ряде отраслей промышленности, в частности для колосников, отжигательных горшков и т. д. Более высокая стоимость отливок обычно с избытком окупается увеличением срока их службы и экономией на расходах по ремонту.



Фиг. 62. Рост чугуна (№ 2) с 16% Cr после работы в течение нескольких месяцев при высоких температурах по сравнению с ростом обыкновенного твердого чугуна (№ 3); № 1 — отливка из легированного чугуна перед началом работы (Electro Metallurgical Co)

Для клапанных вставок в двигателях внутреннего горения разработаны специальные легированные жароупорные чугуны. В состав одного из таких чугунов входит 1,00 — 1,20 Мо, иногда с небольшой добавкой хрома и никеля. Твердость такого чугуна равна 250—270 по Бринелю. Ко второму типу этих чугунов относится чугун с более высоким содержанием легирующих элементов и более жароупорный, совмещающий в себе хорошую вязкость (toughness) с большой твердостью при красном калении. При отливке в песчаные формы получается чугун с белым изломом и с твердостью по шкале С Роквелла около 62. Чугун этот имеет следующий состав: 2% С; 3,0% Cr; 1,25% Si; 4,50 — 5,50% Мо или W.

IV. КЛАССИФИКАЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Классификация чугунов, отвечающая требованиям, предъявляемым к литью, дело нелегкое. В одних случаях главное внимание обращается на прочность чугуна, в других на твердость, сопротивление износу, сопротивление удару, на обрабатываемость, на жароупорность, сопротивление коррозии и т. д. Очень часто предъявляемые к литью требования не могут быть даже формулированы в рамках обычных способов испытания и приходится вводить в спецификацию описание самого способа испытания.

По мере возможности следует специфицировать физические свойства, а не химический состав, так как в одних литейных для достижения определенных физических свойств могут применяться чугуны одного какого-либо состава, тогда как в других литейных оказывается более выгодным получать те же свойства при другом составе отливок, вследствие различия в исходных материалах, способах плавки и т. д. Вводить в спецификацию вместе с физическими свойствами и химический состав не рекомендуется, за исключением лишь специальных легированных чугунов, когда спецификация состава необходима в целях обеспечения некоторых определенных физических свойств.

ПРОЕКТ СПЕЦИФИКАЦИИ A-48-32T¹ АМЕРИКАНСКОГО ОБЩЕСТВА ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ (ASTM)

Классификация по сопротивлению разрыву. Отливки из серого чугуна делятся на классы в зависимости от величины сопротивления разрыву (табл. 47).

Таблица 47.

№ класса	Временное сопротивление разрыву, кг/мм ²
20	14,0
25	17,5
30	21,0
35	24,5
40	28,0
50	35,0
60	42,0

¹ Proceedings Am. Soc. Te t. Mats. m. 32, ч. 1, стр. 625, 1932; Book of ASTM, Проект стандартов, стр. 179. 1932

Изгибающая нагрузка. Это испытание в данной классификации является не обязательным.

По соглашению между поставщиком и заказчиком в технические условия может быть включена и величина соответствующего прогиба (табл. 48).

Таблица 48

№ класса	Величина центральной разрушающей нагрузки в кг для образцов с диаметром		
	22,5 мм	30,5 мм	50,8 мм
	при расстоянии между опорами		
	305 мм	457 мм	610 мм
20	450	850	2250
25	525	950	2750
30	600	1050	3250
35	650	1150	3750
40	700	1250	4500
50	850	1400	5500
60	1000	1550	6500

Размеры образцов. В зависимости от толщины стенок отливки применяют образцы одного из следующих трех размеров (табл. 49).

Таблица 49

Толщина стенок мм	Обозначение образца	Номинальный диаметр образ- ца в литом виде, мм
Не больше 19	A	22,2
От 19 до 27,9	B	30,5
От 27,9 до 50,8	C	50,8

При толщине стенок свыше 50,8 мм применяется образец C или больший, по соглашению поставщика с заказчиком. Размеры образцов, испытываемых на изгиб, таковы (табл. 50).

Таблица 50

Обозначение образца	Диаметр мм	Длина мм	Расстояние между опо- рами, мм
A	22,2	381	305
B	30,5	533	457
C	50,8	686	610

Общие замечания. Определенного переводного коэффициента для пересчета сопротивления разрыву на сопротивление изгибу и обратно не имеется. В таблицах, прилагаемых к спецификации, указываются лишь наименьшие значения прочности.

Химический состав в спецификации имеет подчиненное значение. По соглашению между поставщиком и заказчиком в спецификации может быть оговорено содержание того или иного элемента.

ДРУГИЕ СПЕЦИФИКАЦИИ ASTM

Американским обществом испытания материалов разработаны и другие спецификации для отливок из серого чугуна (табл. 51).

Таблица 51

Спецификации ASTM для чугунных отливок

Обозначения спецификации	Название	Где помещено
A-44-04	Стандартные спецификации для чугунных труб и специального литья	1930, Book of ASTM Standards, ч. 1, стр. 468
A-45-14	Стандартные спецификации для паровозных цилиндров	Там же, стр. 481
A-46-30T	Проект спецификации для закаленных колес	Proceedings ASTM, 1930, т. 30, ч. 1 стр. 976, также 1932, Book of ASTM, Tentative Standards, стр. 172
A-126-30	Стандартные спецификации на чугунные отливки для клапанов, фланцев и фитингов	1930, Book of ASTM, Standards, ч. 1, стр. 409
A-142-32T	Проект спецификаций на дренажные трубы	Proceedings ASTM, 1932, т. 32, ч. 1 стр. 619, также 1932, Book of ASTM, Tentative Standards, стр. 166

Твердость. Часто за характеристику прочности, обрабатываемости или сопротивления износу принимается твердость отливки. Однако ставить одно число твердости основанием классификации литья не безопасно.

Структура. Структура отливки при рассмотрении ее под микроскопом дает ценные указания в отношении физических свойств. Образцы, предназначенные для характеристики отливки, должны выбираться с особой тщательностью. Возможно, что в будущем чугуны смогут быть классифицированы и по структуре.

V. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Термическая обработка при правильном ее проведении и при правильном подборе чугуна улучшает физические свойства [91—104] и расширяет границы применения чугуниного литья. По отношению к термической обработке чугун вполне сравним со сталью, причем основным различием в составе является присутствие свободного графита в сером чугуне.

Способы термической обработки чугуна в общем могут быть разбиты на три группы: 1) отжиг, 2) закалка и отпуск и 3) специальные способы.

ОТЖИГ

Уничтожение внутренних напряжений

Термическая обработка, производимая с целью уничтожения внутренних напряжений, часто носит название — «старение», «нормализация» и «смягчающий отжиг» (mild annealing). Внутренние напряжения в отливках могут быть уничтожены нагреванием отливок до 425—510°, выдержкой при этой температуре в течение 0,5—5,0 час. в зависимости от толщины стенок с последующим медленным охлаждением в печи.

В результате такой обработки твердость уменьшается очень мало, распад цементита очень незначителен, так же как и изменение механических свойств.

При увеличении времени выдержки и при более высоких температурах отжига как прочность, так и твердость уменьшаются. Мягкий чугун с крупными и многочисленными включениями графита теряет свою прочность скорее, чем твердый чугун с мелкими включениями графита или с содержанием карбидообразующих элементов, как например хром, марганец (свыше примерно 0,80%) и молибден. В общем, чем меньше в чугуне кремния и общего углерода, тем меньше потеря прочности и твердости при отжиге, и наоборот.

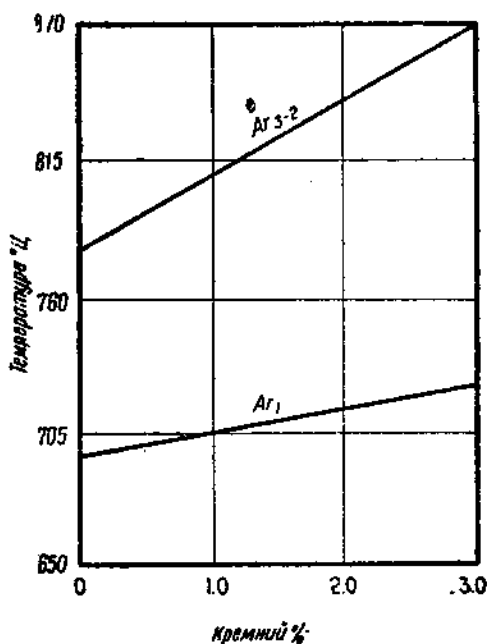
Отжиг колес Гриффина. После отливки колеса подвергают томлению для устранения внутренних напряжений (подробнее об этом см. стр. 127).

Смягчение чугуна для улучшения обрабатываемости

Часто бывает необходимо снизить твердость отливок, в которых имеется некоторое количество свободного цементита, осо-

бенно в углах и в местах, удаленных от литника, где получается отбел чугуна с половинчатым или белым изломом. Иногда также бывает желательно снизить твердость отливки из серого чугуна с целью облегчения и ускорения их механической обработки. В таких случаях отжигают отливки при $760\text{--}815^\circ$. Высоколегированные чугуны иногда приходится отжигать даже при 980° . Независимо от температуры необходимо следить за тем, чтобы отливки при отжиге не окислялись.

Обыкновенный мягкий серый чугун с крупными плотнолежащими включениями графита и ферритовой основой при термической обработке заметно не улучшается; твердость его после закалки недостаточна, что же касается отпуска, то прочность после такового может улучшаться, но может остаться и без изменения. Мелкие отливки, с мелкораспределенным графитом и с металлической основой, содержащей большие количества перлита, могут быть улучшены при условии надлежащей термической обработки. Всегда можно, однако, опасаться, что в присутствии большого количества кремния цементит может при нагреве распасться на графит и феррит, и в результате вместо увеличения



Фиг. 63. Зависимость критических точек чугуна от содержания кремния в обыкновенных чугунах с 3,3% общего углерода

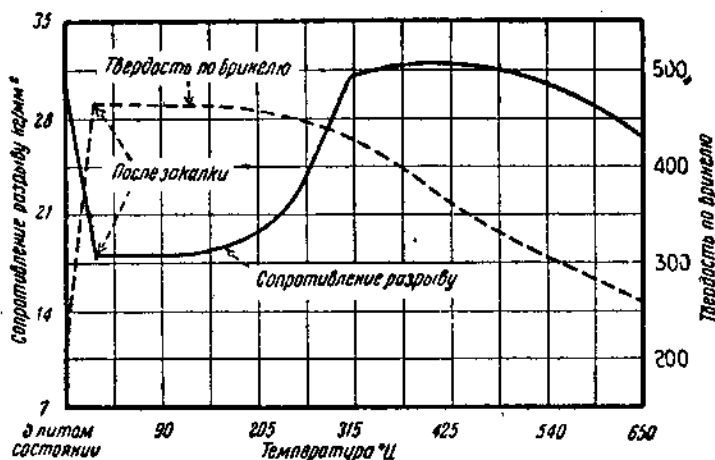
твердости чугун станет еще более мягким. Для того чтобы термическая обработка достигала цели, графитовые включения должны быть мелкими, распределенными равномерно и не должны лежать плотно друг к другу, металлическая же основа должна быть перлитовой. Содержание графика в чугунах, подвергавшихся термической обработке, должно быть около 2,0—2,4%, содержание связанного углерода — в пределах от 0,60 до 0,90%.

При этих условиях серый чугун ведет себя при отжиге и закалке так же, как углеродистая инструментальная сталь.

Твердость чугуна возрастает прямо пропорционально скорости закалки при температуре выше критической, соответственно фиг. 63.

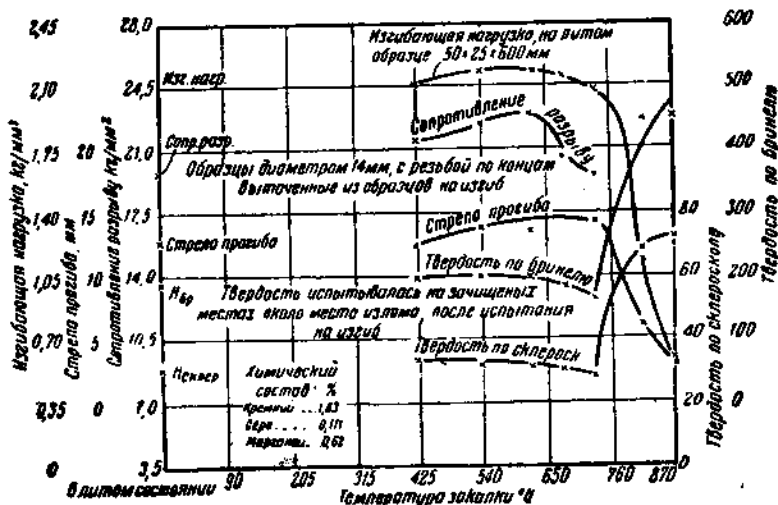
По мере того как температура отпуска возрастает выше 175° , происходит равномерное смягчение закаленного чугуна. Отпуск при температурах ниже 175° никакого почти влияния на твердость не оказывает. Механические свойства — сопротивление раз-

рыву, модуль упругости и сопротивление удару—определенно улучшаются (фиг. 64). Влияние температуры заковки показано на фиг. 65. Увеличение твердости при заковке всегда сопровождается снижением прочности. Восстановление первоначальной



Фиг. 64. Влияние температуры отжига на свойства чугуна

прочности отливок достигается обыкновенно отпуском до температур выше 260° , а по мере того как температура отпуска возрастает до $510-535^{\circ}$ сопротивление как разрыву, так и удару увеличивается примерно на 20—50% в зависимости от физического строения и распределения графита в исходном материале.



Фиг. 65. Влияние температуры заковки на свойства чугуна (Harper a. Mac Pherran)

Нагрев отливок перед заковкой должен производиться осторожно, медленно и равномерно. По достижении требуемой темпера-

туры отливки должны быть выдержаны в течение достаточного времени, для того чтобы они смогли во всех своих частях прогреться до требуемой температуры. Для сравнительно мелкого литья выдержка должна быть не меньше 30 мин. Отливки, небольшие и симметричные по размерам, можно нагревать предварительно в одной печи до 150—260°, а затем переводить в другую печь, уже нагретую до температуры закалки. Таким способом удастся предупредить трескание отливок и удешевить процесс.

В большинстве случаев чугуны закаливаются при 790—840°. Закалка производится обыкновенно в масле, хотя в некоторых случаях применяют воду, в зависимости от состава металла. Иногда состав отливок допускает закалку в струе воздуха или на воздухе. Дельбар [Delbart, 115] указывает, что хорошие результаты получаются при закалке малоуглеродистых чугунов с высоким содержанием марганца. Марганец способствует понижению температуры превращения, особенно при содержании около 2%. В этом случае отливки могут быть закалены на воздухе.

В общем, смягчение отливок в целях облегчения их обработки сопровождается снижением их прочности и содержания связанного углерода, наряду с чем количество графита в чугуне возрастает. Как то, так и другое изменение в составе и свойствах каждого данного чугуна зависит, главным образом, от температуры отжига и продолжительности выдержки. Малокремнистые, малоуглеродистые и графитистые чугуны более устойчивы в отношении изменения их структуры, чем высококремнистые, высокоуглеродистые чугуны, и поэтому для достижения одинаковой степени смягчения их приходится не только нагревать сильнее, но и выдерживать дольше. Точно так же и чугуны, содержащие карбидообразующие элементы, как например хром, менее чувствительны к отжигу по сравнению с обыкновенными серыми чугунами.

Полностью отоженные серые чугуны, т. е. такие, в которых нет связанного углерода, могут иметь твердость от 120 до 130 по Бринелю, тогда как твердость легированных чугунов после полного отжига может равняться 130—180 по Бринелю и больше, в зависимости от химического состава.

Отжиг белых и половинчатых чугунов для получения высококачественного серого чугуна

Для того чтобы получить обрабатываемые чугуны с высоким сопротивлением разрыву (от 42 до 63 кг/мм²) белые или половинчатые чугуны после заливки отжигают с целью разложения карбида на феррит и графит. Такие чугуны носят название «полуковких» (semimalleable) и «быстро отжигающихся ковких» (short anneal malleable). Ни в коем случае не следует смешивать их с настоящим ковким чугуном, состоящим, главным образом, из феррита и округленных включений графита, или так называемого углерода отжига, тогда как «полуковкий» чугун содержит значительное количество связанного углерода и часто состоит сплошь из перлита. Содержание общего углерода обычно

венно равняется 2,00—2,80 %, количество кремния различно в зависимости от толщины отливки, но, как правило, не превышает 1,80 %.

Типичным для отжига таких чугунов служит следующий режим:

нагрев до 925—955°,
выдержка в течение 1,5—3 час.,
охлаждение до 745° в течение 3 час.:

- а) закалка в масле и отпуск, или
- в) охлаждение на воздухе, или
- с) медленное охлаждение в печи.

Твердость таких чугунов в зависимости от состава колеблется в пределах от 150 до 200 по Бринеллю.

В качестве легирующих элементов применяется никель, молибден и т. д. После отжига получается чугун высокой прочности, достаточно вязкий и с высоким сопротивлением.

ЗАКАЛКА И ОТПУСК

Для увеличения сопротивляемости чугуна износу и истиранию применяется закалка при температурах выше критической. Дельбар [Delbart, 115] указывает, что хорошие результаты получаются при закалке малоуглеродистых чугунов с высоким содержанием марганца. Марганец способствует понижению температуры превращения, особенно при содержании около 2%. В этом случае отливки могут быть закалены на воздухе. Дельбар получал превосходные результаты при закалке чугунов состава 2,5% С_{общ.} и 2% Mn. Херст [Hurst] также подтверждает полезность марганца. Имеются указания на то, что 1% Mn и 1—2% Ni оказывают заметное влияние на результаты закалки. Это объясняется тем, что как марганец, так и никель действуют в одном направлении, и таким образом влияние их суммируется.

Состав металла в сильной степени зависит от того, какие требования предъявляются к нему в смысле обрабатываемости в литом состоянии. Отливки, подлежащие закалке, предварительно обрабатываются начерно, а после закалки и отпуска отделяются начисто на наждачном круге. Так как закалка сопровождается некоторым увеличением объема изделия (рост), то необходимо предусматривать это, давая определенный припуск на шлифовку. В тех случаях, когда прочность и сопротивление удару не имеют основного значения, отпуск после закалки можно не производить.

Имеющиеся в литературе данные по вопросу об изнашиваемости закаленных цилиндрических гильз крупных двигателей внутреннего горения показывают, что закалка увеличивает сопротивление износу в 2—7 раз по сравнению с литым металлом.

Закалкой можно увеличить твердость металла до 600 по Бринеллю в зависимости от состава. Особенно большая твердость получается в тех чугунах, которые считаются неподдающимися обработке в литом состоянии.

Легирующие элементы—никель, молибден, марганец—понижа-

ют температуры критических превращений при охлаждении, в то время как хром их повышает. Все эти четыре элемента уменьшают критическую скорость закалки и способствуют образованию мартенсита при медленном охлаждении. Конечная степень твердости определяется средней величиной твердости металлической основы и графита. Нужно еще раз подчеркнуть чрезвычайно большое значение, которое имеет форма, величина и распределение графитовых включений. Перед закалкой металл может быть полностью или частично отожжен без заметного вреда для твердости после закалки при том условии, если в чугунах нет крупных, лежащих плотно друг к другу включений графита.

Как при нагреве перед закалкой, так и при самой закалке, нужно избегать резких перемен температуры, особенно в отношении отливок крупных или с неравномерной толщиной стенок.

АЗОТИРОВАНИЕ

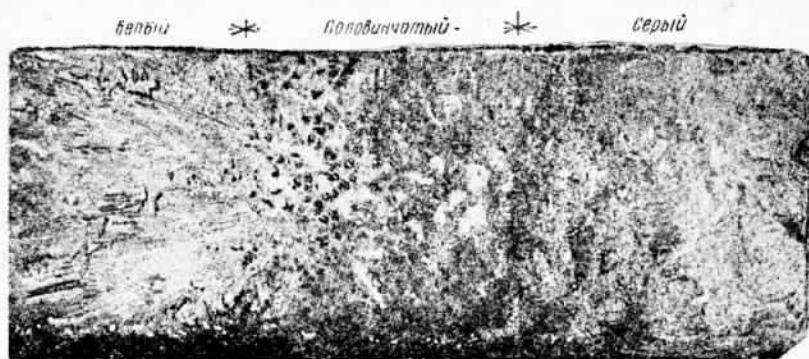
Для придания поверхности отдельных отливок твердости в 800—950 по Бринелю отливки подвергают азотированию [96, 97], главным образом, в тех местах, от которых требуется очень большое сопротивление износу. Процесс азотирования состоит в том, что отливки подвергают действию паров аммиака при температуре в 510—540° в течение 60—90 час.

Первоначально для азотирования применялись малоуглеродистые, хромистые и алюминиевые чугуны, до некоторой степени сходные с азотируемыми сталями. Имеются указания на то, что удовлетворительно азотируются и хромовованадиевые чугуны. Для повышения прочности и вязкости в азотируемые чугуны вводят никель.

VI. БЕЛЫЕ И ЗАКАЛЕННЫЕ ЧУГУНЫ

ОБЩЕЕ

«Белый чугун» представляет собой такой чугун, в котором весь углерод практически находится в связанном состоянии. Целью закаливании (отбеливания) чугуна служит получение на отбеленной поверхности слоя определенной толщины, в котором весь углерод находится в связанном состоянии. Понятно, что твердость этого слоя будет выше, чем в остальных частях отливки, вследствие чего сопротивление этого слоя износу или истиранию повысится. Получение белого (закаленного, отбеленного) чугуна облегчается ускорением охлаждения чугуна при заливке его в металлические изложницы. При быстром охлаждении углерод остается в связанном состоянии.



Фиг. 66. Излом чугунной отливки с постепенным переходом от белого чугуна к половинчатому и далее к серому (Mac Pherran)

Отливки из закаленного чугуна применяют для дробилок, вагонных колес, лемехов, штампов, закаленных валиков для резины, бумаги и металла, досок для волочения проволоки и для целого ряда других отливок, от которых требуется большое сопротивление истиранию.

Структура отбеленных чугунных отливок обыкновенно состоит из трех зон: белого, половинчатого и серого чугунов (фиг. 66). Образование этих зон зависит от следующих факторов: а) химического состава, б) температуры заливки, в) толщины отливки в

отбеленных частях, г) температуры кокиля и д) толщины стенок кокиля.

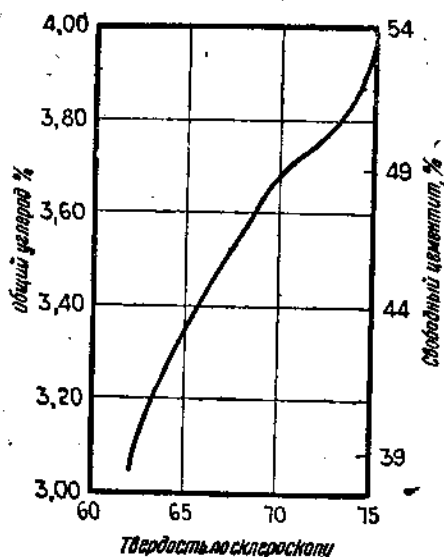
Требуемая толщина отбеленного слоя определяется условиями работы отливки. Отбеленные части отливки обладают повышенным сопротивлением износу, но хуже сопротивляются ударам.

Отливка с очень толстым отбеленным слоем может поэтому хорошо сопротивляться износу, но оказаться совершенно непригодной вследствие малой прочности на удар. В тех случаях, когда отливка должна подвергаться действию ударов, часто отбеливают поверхность лишь на одну треть толщины стенки.

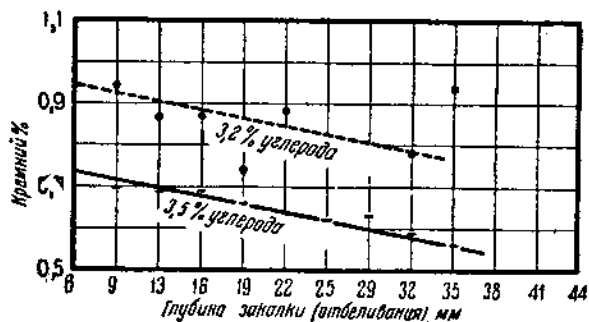
Толщина средней зоны, состоящей из более или менее половинчатого чугуна, определяется, с одной стороны, составом металла, с другой — толщиной стенок.

Отливки из белого чугуна получают без кокилей, и охлаждение происходит более или менее равномерно со всех сторон.

Фиг. 67. Зависимость твердости по склероскопу от общего содержания углерода (Y. Ehrler)



Состав чугуна подбирается так, чтобы наружные слои получились белыми, а середина — из половинчатого или серого чугуна для придания отливке прочности и требуемого сопротивления удару. Соотношение между толщинами каждой из этих зон зависит от условий работы отливки. В отдельных случаях отливка изготовляется сплошь из белого чугуна.



Фиг. 68. Влияние углерода и кремния на глубину закали (отбеливания) (Y. Ehrler)

Толщина отбеленного слоя регулируется обыкновенно изменением содержания кремния и общего углерода. При прочих равных условиях уменьшение количества кремния или общего

углерода способствует утолщению отбеленного слоя, тогда как при увеличении содержания кремния или общего углерода толщина слоя уменьшается. При большом содержании углерода чугун имеет обыкновенно крупнозернистое строение, строение малоуглеродистых чугунов, наоборот, мелкозернистое. Все, что замедляет охлаждение, как например увеличение размеров отливки или толщины стенок или удаление отливки от кокиля в течение критического периода, влечет за собой также и уменьшение толщины отбеленного слоя.

По мере увеличения количества кремния содержание связанного углерода уменьшается вследствие графитизирующего действия кремния. По мере увеличения скорости охлаждения, как например при отливке в кокиль, времени может оказаться недостаточно для того, чтобы действие кремния или углерода могло проявиться. Вообще говоря, любой чугун будет твердым при достаточно быстром охлаждении и мягким при достаточно медленном охлаждении.

Высокое содержание марганца или серы усиливает отбел. Хром оказывает определенно отбеливающее влияние. Часто хром применяется вместе с никелем. Влияние углерода на твердость показано на фиг. 67. Фиг. 68 показывает влияние углерода и кремния на толщину отбеленного слоя.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Закалка и отжиг белого чугуна применяются редко. Отбеленная поверхность сама по себе уже претерпевает ускоренное охлаждение. Слишком резкая перемена температуры может также повлечь за собою появление на отливке трещин.

Некоторые виды отливок из закаленного чугуна обрабатываются термически для уничтожения внутренних напряжений. Один из видов такой термической обработки, применяемой для закаленных вагонных колес (Гриффина), заключается в следующем.

После того как колеса охлаждаются в формах примерно до 760° , их удаляют из форм и переносят в закрытый колодец с температурой около $370-480^{\circ}$, который можно подогревать мазутом в случае необходимости. В холодный колодец колеса помещать нельзя. После выдержки колес в колодце в течение 24 час. температура их падает примерно до 540° . Тогда вынимают колеса из первого колодца и переносят во второй колодец с температурой около 315° и снова оставляют на 24 часа. Колеса охлаждаются при этом примерно до 340° , после чего вынимаются и подаются на очистку. При таком способе обработки внутренние напряжения уничтожаются, твердость же не снижается. Процесс идет непрерывно, и по мере того как одна партия колес вынимается из колодца, немедленно же загружается следующая. Это способствует одновременной обработке и сохраняет тепло в колодцах. Слишком высокая температура в первом колодце может, понятно, вызвать смягчение отбеленного слоя.

Для валков из легированного чугуна (хромоникелевые валки)

замедленное охлаждение в отжигательной печи оказывается полезным в тех случаях, когда валки склонны к тресканию. После того как валки охлаждаются до температуры ниже эвтектоидной, их вынимают из форм и переносят в печь, где они охлаждаются медленнее, чем в форме.

ТВЕРДОСТЬ

Твердость обыкновенного белого ваграночного чугуна по склероскопу равна 60—65, для ваграночного отбеленного чугуна твердость равна 65—75.

В легированных чугунах, особенно содержащих хром и никель, твердость по склероскопу больше. При содержании около 5% Ni и 2,5% Cr твердость чугуна по склероскопу может равняться 95—100, или 650 по Бринелю. Такого типа чугуны и стоят дороже. Твердость может быть увеличена также за счет присадки только хрома; никель добавляется для увеличения вязкости. Определенной зависимости между твердостью и сопротивлением износу до настоящего времени не установлено.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОТЛИВКИ ИЗ ЗАКАЛЕННОГО И БЕЛОГО ЧУГУНА

Хром. При отсутствии других легирующих элементов, хром увеличивает глубину закалки (отбеленного слоя), и в результате увеличения количества карбидов одновременно возрастает и твердость. Часто хром добавляется вместе с никелем, молибденом или медью; рекомендуется также добавлять хром с алюминием.

Никель. В отбеленных отливках один никель применяется редко. Обыкновенно он вводится вместе с хромом. Сам по себе никель уменьшает толщину отбеленного слоя.

Прочность внутренней части отливки возрастает вследствие более равномерного распределения графита. По силе своего влияния на уменьшение толщины отбеленного слоя 3 части никеля эквивалентны 1 части кремния.

Никель и хром. Обыкновенно считают, что каждый из этих элементов уравнивает вредное влияние другого, в отношении же оказываемой ими пользы они друг друга дополняют. При правильном соотношении никеля к хрому чугун приобретает твердую мелкозернистую структуру, хорошо сопротивляющуюся износу. Недавно появился новый сорт хромоникелевого белого чугуна, под названием «Ni-Hard», свойства которого приведены в табл. 52. Испытания показывают, что чугун Ni-Hard более вязок и лучше сопротивляется износу, чем нелегированный закаленный чугун.

Молибден в закаленном чугуне увеличивает прочность, но на твердость, повидимому, никакого влияния не оказывает. До некоторой степени он улучшает сопротивление износу.

Для валков, от которых требуется прочность и теплопроводность, с успехом применяют медистомолибденовый чугун.

Результаты испытаний отбеленных углеродистых чугунов и никелевого чугуна Ni-Hard

Показатели	Углеродистый чугун		Никелевый чугун	
	высокоуглеродистый	малоуглеродистый	высокоуглеродистый	малоуглеродистый
Твердость по Бринеллю на отбеленной поверхности	500	400	650—700	575
Временное сопротивление разрыву в отбеленных частях, кг/мм ²	От 24,5 до 28,0	От 33,6 до 37,1	От 38,5 до 42,0	От 49,0 до 56,0
Временное сопротивление разрыву в неотбеленных частях, кг/мм ²	От 11,2 до 17,5	От 15,4 до 27,3	От 21,0 до 24,5	От 28,0 до 35,0
Общий углерод, %	3,50	2,75	3,50	2,75
Кремний, %	0,75	0,75	0,75	0,75
Никель, %			4,50	4,50
Хром, %			1,50	1,50

Ванадий в белом и закаленном чугунах полезен как элемент, измельчающий дендриты и тем самым способствующий получению более вязкого металла, как это доказывается испытаниями на удар.

Медь уменьшает толщину отбеленного слоя. В отдельности применяется редко. Обычно добавляется вместе с молибденом или с молибденом и хромом.

Алюминий. Действие алюминия в закаленном чугуне еще в полной мере не изучено. Можно сказать определенно, что он служит сильным графитизатором и раскислителем, так что в результате присадки алюминия толщина отбеленного слоя уменьшается.

По силе своего графитизирующего действия алюминий вдвое слабее кремния. К числу очень серьезных недостатков, связанных с присадкой алюминия, Смит и Ауфдерхаар [Smith a. Aufderhaar, 104] относят сильное выделение газа при заливке, вызывающее раковины в отливках.

VII. СВАРКА

Сварка чугуна в настоящее время применяется очень широко как при ремонтных работах, так и в различных типах конструкций.

В ближайшее время следует ожидать еще большего распространения этого способа, так как и сами методы сварки и материалы непрерывно совершенствуются.

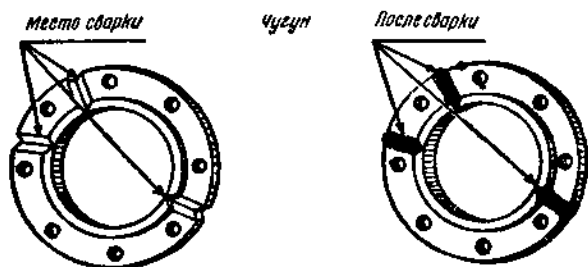
Трудность сварки чугуна заключается в образовании твердых мест вокруг места сварки вследствие растворения графита чугуна в сварочном металле и резкого охлаждения чугуна. При охлаждении могут образоваться твердые карбиды, делающие невозможной механическую обработку этих участков, а иногда служащих причиной образования трещин.

ГАЗОВАЯ СВАРКА

Кислородоацетиленовая (автогенная) сварка чугуна производится чугунами или бронзовыми прутками.

Сварка помощью чугунных прутков

При соблюдении известных мер предосторожности этот способ дает превосходные результаты в смысле обрабатываемости сваренного чугуна. Перед сваркой отливку нужно подогреть и по

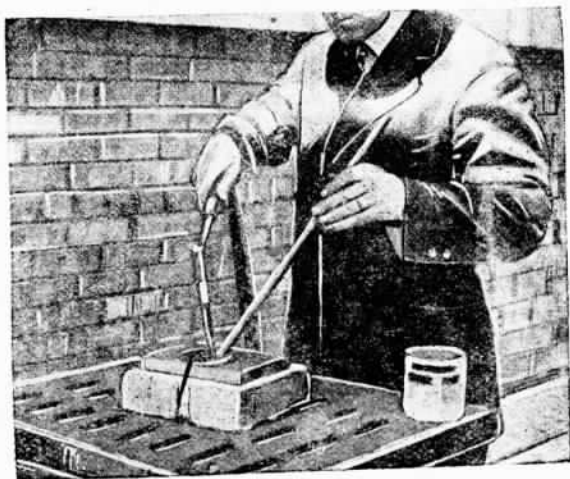


Фиг. 69. Правильное скашивание кромок шва перед сваркой (Linde Air Products Co)

окончании охлаждать очень медленно. Нужно также считаться с возможностью термического сжатия и расширения отливки, вызываемого ее нагреванием.

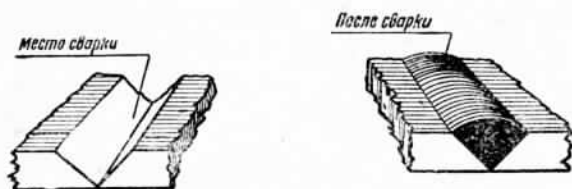
Подготовка. Для того чтобы подготовить отливку к сварке, острые кромки излома должны быть скошены под углом в 45°

внутри на глубину около 3 мм так, чтобы в разрезе образовалась треугольная канавка (V-образная) с прямым углом при вершине (фиг. 69). Скошенные края очищаются шлифовальным кругом или щетками от окалины, ржавчины, жира или грязи.



Фиг. 70. Правильное положение горелки и прутка при сварке (Linde Air Product, Co)

Сварка. После нагрева отливки до темнокрасного каления приступают к сварке. Сварщик прежде всего оплавляе т треугольное углубление по бокам и на дне таким образом, чтобы получить ванну жидкого металла на длину около 2,5 см. Сварочный пруток, нагретый почти до плавления, погружается в ванну так, чтобы конец стержня все время оставался под поверхностью ванны. Правильное положение стержня при сварке показано на фиг. 70. От времени до времени прутки вынимают из ванны, погружают во флюс и снова переносят в ванну. Образование газовых пузырьков и блестящих точек показывает на наличие загрязнений, которые необходимо вывести на поверхность энергичным помешиванием металла прутком и добавлением флюса.



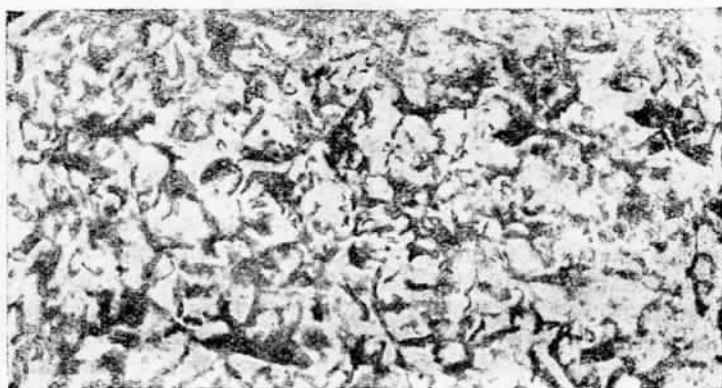
Фиг. 71. Правильная сварка (Linde Air Product, Co)

Когда шов на длине в 2,5 см будет наварен несколько выше соседней поверхности (фиг. 71), переходят на следующий участок и заканчивают сварку возможно быстрее.

Так как при быстром охлаждении шва можно опасаться образования белого чугуна, нужно охлаждать отливку возможно медленнее. Большие отливки можно охлаждать в нагревательной печи, мелкие лучше всего охлаждать в каком-нибудь теплоизоляционном материале, вроде асбестовой фибры, цемента, или гашеной извести. На фиг. 72 показана структура правильно сваренного и медленно охлажденного чугуна.

СВАРКА БРОНЗОЙ

Сварка помощью бронзового прутка не ухудшает свойства отливки, так как производится при температуре ниже температуры плавления чугуна. В этом случае нет надобности подогревать всю отливку целиком, достаточно нагреть лишь места, подлежащие сварке. Сварка бронзой широко применяется в ремонтных работах по исправлению чугунных деталей и для поверхностной наварки отливок.



Фиг. 72. Структура сваренного чугуна (Linde Air Products Co)

Подготовка. Скашивать края свариваемых мест необязательно, но желательно при сварке впритык стенок толще 3 мм. Кромки защищаются шлифовальным кругом или щетками и промываются бензином для удаления следов жира.

Сварка. Главное значение имеет слегка окислительный характер пламени и подбор соответствующего флюса. Перед началом собственно сварки нагревают горелкой небольшой участок так, чтобы расплавленная бронза с прутка распределилась тонким слоем на чугуне, образуя таким образом нечто вроде полуды, способствующей более прочному привариванию бронзы к чугуну. В некоторых случаях приходится наплавлять бронзу последовательными слоями. Прочность в месте сварки не уступает при хорошем выполнении шва прочности основного металла.

Газовая сварка широко применяется в литейных для заварки поверхностных дефектов в чугунных отливках, хотя и не мешающих использованию отливок по назначению, но портящих их

внешний вид. Такие дефекты легко и надежно могут быть исправлены при помощи сварки. Сработанные части механизмов точно так же могут быть восстановлены наваркой металла до требуемых первоначальных размеров, наконец, всякого рода ремонтные работы, даже исправление треснувших автомобильных цилиндров, также с успехом выполняются при помощи сварки.

ЭЛЕКТРОСВАРКА

Чугун можно с успехом сваривать при помощи электрической дуги. Успех этого рода сварки во многом зависит от характера отливки, типа шва и квалификации сварщика. Основным недостатком такой сварки заключается в слабости шва. Слабость же шва зависит от неудовлетворительного расплавления, от образования белого чугуна в зоне плавления и от внутренних напряжений в шве.

Чугун является плохим проводником тепла и электричества. вследствие чего его неудобно применять, как электрод, и в качестве такового применяется обыкновенно сталь или цветные металлы. Как известно, при нагреве чугуна до плавления и при последующем быстром охлаждении серый чугун превращается в белый. Этому превращению еще более способствует наличие жидкого стального электрода, который растворяет в себе графит из чугуна, по соседству со швом, в результате здесь образуется не только твердый и хрупкий белый чугун, но и твердая и хрупкая высокоуглеродистая сталь. При охлаждении сталь садится значительно сильнее, чем чугун, вследствие этого середина стального шва садится почти на 50% больше, чем окружающий чугун. Понятно, что эта разница в усадке обуславливает возникновение внутренних напряжений во шве, могущих послужить причиной появления трещин и поломки.

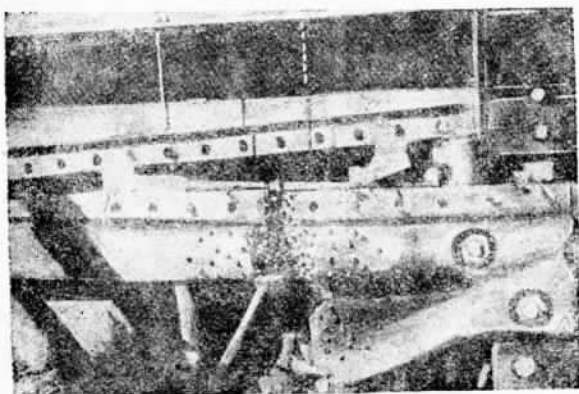
Электроды. Для электродов, в целях удешевления их и увеличения прочности берется мягкая сталь. Если требуется механическая обработка после сварки, то применяются цветные металлы, например монель-металл и электроды с большим содержанием никеля.

Для заполнения шлаковых раковин часто пользуются проволокой никелевой или из монель-металла. При глубоком шве, если шов должен быть прочным, применяется сталь, а в местах, подлежащих обработке, употребляются электроды из никелевых сплавов.

Прошпиливание. Для укрепления сварочного шва в чугуне применяют простановку стальных шпилек в небольшие дыры с резьбой (фиг. 73). Навариваемый металл сплавляется со шпильками: после сварки шпильки слегка растягиваются, разгружая таким образом чугун от напряжений и предохраняя его от трескания.

Подогревание. Перед сваркой рекомендуется подогревать отливки до темнокрасного цвета в целях облегчения сплавления, предупреждая образование внутренних напряжений и уменьшая склонность металла к тресканию и образованию твердых мест, не поддающихся обработке. Для той же цели служит и отжиг

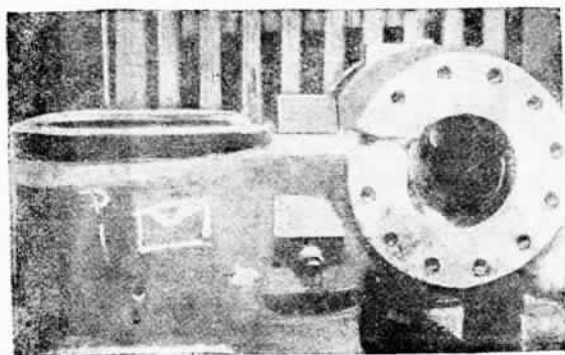
после сварки, особенно для смягчения чугуна. Часто вместо подогрева отливок предпочитают сваривать медленно при низкой температуре, иначе говоря, с электродами, плавящимися при низкой температуре, причем результаты получаются вполне удовлетворительные.



Фиг. 73. Простановка шпильек в отливке перед сваркой (General Electric Co)

Очистка. Все свариваемые поверхности должны быть тщательно очищены; окалина и песок удаляются, и делается канавка (фиг. 74).

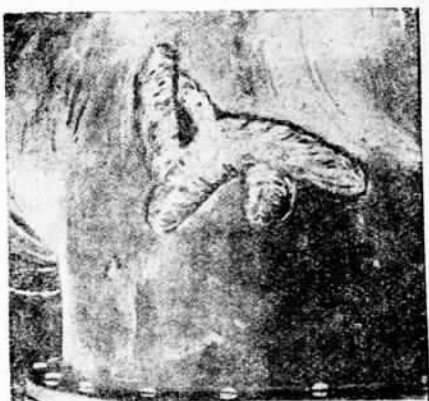
Сварка. Если отливка предварительно не подогревается, то сварку производят медленно, избегая слишком сильного нагрева отливки. Полезно сначала наложить слой металла на всю подлежащую заварке поверхность и затем уже наваривать заподлицо



Фиг. 74. Трещина, подготовленная для сварки (General Electric Co)

с остальной поверхностью отливки. Сначала наваривают короткий валик не длиннее 2,5 см и дают остыть, чтобы предупредить образование изгибающих напряжений между чугуном и швом.

Каждый валик нужно наклепать в разогретом добела состоянии ручным молотком с шаровидным бойком или пневматическим молотком для уничтожения напряжений и распределения сварочного металла. После того как валик будет закончен и прокован, следующий валик делают несколько отступя от первого во избежание перегрева отливки. Показателем последнего служит возможность держать палец на отливке на расстоянии 50 мм от шва. По другому способу, недавно введенному в практику, применяются чугунные электроды, покрытые обмазкой, которые хоро-



Фиг. 75. Отливка, подготовленная к сварке (Lincoln Electric Co)

Фиг. 76. Оглизка по фиг. 75 после сварки (Lincoln Electric Co)

шо расплавляются и заполняют шов под действием дуги. Для тонкостенного литья рекомендуются прутки из медных сплавов, вместо никелевых, или из монель-металла.

Прочность отливок, сваренных надлежащим образом, почти не уступает исходной прочности, и при известном внимании при сварке можно не опасаться ни трещин, ни твердых мест. Пример дуговой сварки показан на фиг. 75 и 76. На фиг. 75 изображена отливка с трещиной, очищенной, и с проставленными шпильками. Та же отливка после сварки изображена на фиг. 76.

VIII. ГЛАВНЕЙШИЕ ЛИТЕЙНЫЕ ФАКТОРЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЧУГУННОГО ЛИТЯ

В задачи конструирования литой детали входит: 1) определение конфигурации или формы отливки, 2) определение толщины стенок отливки, 3) сопряжение между собой стенок различной толщины. Наряду с этим имеется еще ряд очень важных моментов, которые должны быть приняты в соображение, как например, выбор материала и способа производства отливки, так как и то и другое сильно влияет на конструкцию. Приводимые в разных местах настоящей книги данные о свойствах различных типов чугунов могут оказаться полезными при выборе материала для каждого данного случая практики.

При конструировании деталей для горячейковки и штамповки, сварки и протяжки всегда принимаются во внимание технологические особенности производства. Что же касается литых деталей, то вопрос о влиянии особенностей литейной технологии изучен сравнительно мало, главным образом, вследствие укоренившегося мнения, что конфигурация отливки никакой роли не играет.

Если в известном смысле это и правильно, то все же для производства отливок наиболее экономическим способом и с наилучшими свойствами конструктор должен сообразоваться и с материалом, и со способом производства отливки, и с целым рядом других линейных факторов.

Иллюстрацией к сказанному могут служить случаи замены литых частей сварными, когда приходится упрощать конструкцию для возможности получения ее сваркой. В большинстве подобного рода случаев оказывается, что ту же самую деталь можно сделать и дешевле и прочней именно отливкой при правильной конструкции и учете условий производства. За последнее время вопрос о конструировании литых деталей начал освещаться все чаще и чаще [105—114]. В частности, серьезное внимание начали уделять вопросу об уменьшении веса отливок. Целым рядом примеров можно доказать, что облегчение веса отливок в значительной мере упрощает формовку (фиг. 76 и 77) и увеличивает производительность.

Высококачественные чугуны, введенные за последнее время в литейную практику, в значительной мере способствуют экономии в весе отливок.

Ниже рассмотрены вкратце наиболее важные специфические

особенности производства отливок, которые, так или иначе, влияют на конструкцию.

Сотрудничество конструктора и технолога

Для того чтобы избежать непроизводительных расходов, в обсуждении проекта конструкции должны принимать участие также технологи, могущие внести возможные изменения в конструкцию в целях упрощения формовки и заливки (фиг. 78) и улучшения или удешевления производства. И конструктор и технолог должны хорошо разбираться в том, какой метод формовки окажется наилучшим для данной конструкции, и наметить соответствующие измерения, которые могут оказаться нужными для обеспечения доброкачественности литья.

Уклоны на моделях

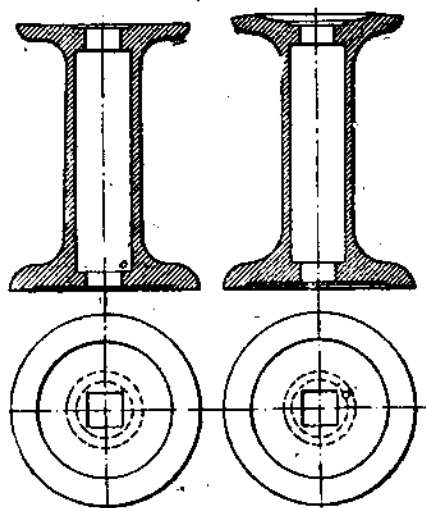
Все вертикальные стенки моделей делаются со скосом для облегчения выема модели из земли без чрезмерного расгаливания модели и во избежание срыва земли (фиг. 79).

Независимо от типа модели скос должен быть всегда предусмотрен в конструкции. На чертежах необходимо всегда указывать, как следует выполнять уклоны на модели, за счет ли увеличения или уменьшения размеров самой отливки, — так как очень часто от этого зависит последующее использование отливки.

Величина уклонов зависит от вида и величины модели и способа формовки. Для машинной формовки дается самый малый уклон. На внутренних поверхностях уклон обычно делается больше, чем на наружных. Нормально следует делать уклон не меньше 5 мм на 1 м и предусматривать его в конструкции.

Припуски на усадку

При охлаждении отливки в форме происходит изменение объема отливки, выражающееся в уменьшении ее размеров, поэтому все измерения для модели должны быть увеличены на величину усадки. Величина усадки зависит от конструкции отливки, температуры заливки сплава и его состава, а также степени податливости формы. В тех случаях, когда нормальная усадка отливки затрудняется наличием, например, фланцев, расположенных под

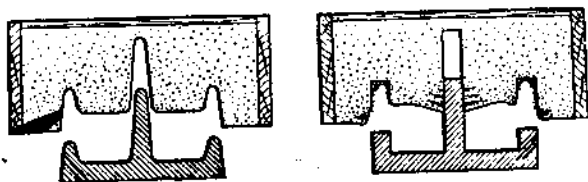


Фиг. 77. Исправление конструкции литой детали (Н. Bornstein)

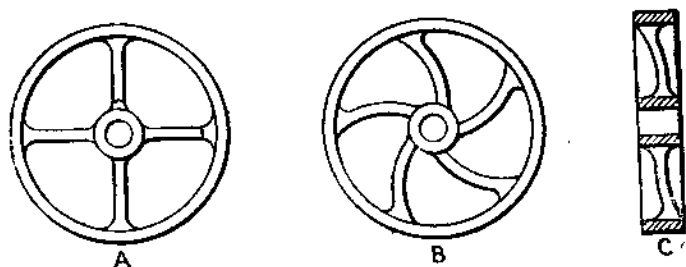
углом к направлению усадки, приходится принимать меры против трещин в отливке. Меры эти в каждом частном случае различны. На фиг. 80 изображен один из способов предупреждения трещин (изменение конструкции отливки).



Фиг. 76. Улучшение конструкции с учетом литейной практики (W. W. Kerlin)



Фиг. 79. Значение правильных модельных уклонов („Foundry Trade Journal“)



Фиг. 80. Улучшенная конструкция детали для облегчения усадки (W. W. Kerlin)

В зависимости от длины и конструкции модели припуски на усадку также неодинаковы вследствие колебаний в усадке многих сплавов, особенно высококачественных чугунов, при охлаждении их в форме. Нормальная усадка серого чугуна, имеющего сопротивление разрыву в 26 кг/мм^2 , равна 10 мм на длине в 1 м (0,01). В зависимости же от длины и конструкции модели усадка серого чугуна выражается следующей рекомендуемой шкалой:

Модель длиной	до 60 см без стержней	10 мм
"	" от 60 " до 120 см "	8,5 "
"	" свыше 120 см "	7 "
"	" до 50 см со стержнями	10 "
"	" от 70 " до 90 см "	8,5 "
"	" свыше 90 см "	7 "

Припуски на механическую обработку

Для обрабатываемых поверхностей размеры модели в соответствующих местах увеличиваются. Величина припусков на обработку зависит от характера, сплава, от конфигурации, от вели-

ны отливки, от большей или меньшей склонности отливки к короблению, от способа механической обработки.

По мере возможности нужно формировать так, чтобы части отливки, подлежащие обработке, расположены были в нижней опоке, так как опасность образования всякого рода дефектов, вроде усадки, раковин и засоров, здесь меньше, чем в верхней опоке. Если по каким-либо соображениям обрабатываемые поверхности приходится помещать в верхней опоке, то припуск на обработку для этих поверхностей должен быть увеличен. Только для некоторых типов отливок можно обойтись совсем без припусков при условии особо тщательного подбора земли и краски для форм.

Обычно на обработку даются следующие припуски:

Модели до 30 см	2,4 мм для дыр 3,0 мм
" от 32 до 60 см	3,2 " " " 4,8 "
" " 62 " 105 "	4,8 " " " 6,3 "
" " 107 " 150 "	6,3 " " " 7,9 "
" " 152 " 200 "	7,9 " " " 9,5 "
" " 202 " 305 "	9,5 " " " 11,1 "
" выше 305 см	по особой инструкции

Разъем

Для упрощения формовки линии разъема модели должны быть по возможности наиболее простыми. Сложных разъемов нужно избегать, так как они усложняют формовку и увеличивают стоимость очистки.

Питание отливки

Металл при заливке должен беспрепятственно поступать из одной части формы в другую. Если в отливке имеются части, неодинаковые по толщине стенок, то необходимо принять меры к питанию более толстых частей помощью прибылей и выпоров для компенсации усадки при затвердевании.

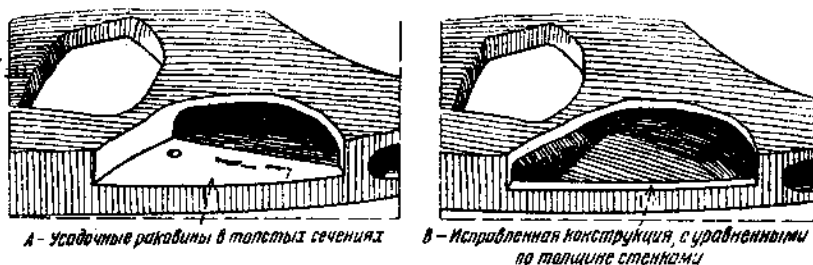
Отливка должна иметь достаточную толщину, для того чтобы можно было дать литейнику такие размеры, которые могли бы обеспечить надлежащее заполнение формы и питание отливки.

Толщина стенок

С литейной точки зрения одинаковая толщина стенок является желательной, так как такая отливка охлаждается во всех своих частях с одинаковой скоростью, что упрощает питание и литейную систему. Неравномерное охлаждение отливки ведет к образованию усадочных раковин, трещин и внутренних напряжений (фиг. 81). Причины напряжений, обусловливаемых разницей в толщине стенок, хорошо иллюстрируются фиг. 82, на которой даны сравнительные изменения длины двух брусков квадратного сечения, одного со стороной в 19 мм и другого со стороной в 38 мм. Если этой неоднородности по толщине избежать нельзя, то нужно, по крайней мере, делать плавный переход от одной толщины к другой. Неодинаковая скорость усадки в толстых и тон-

ких стенках служит причиной появления трещин и образования дендритов, что само по себе уже уменьшает прочность отливки.

Правильно сконструированной можно назвать такую отливку, стенки которой имеют толщину не большую, чем это нужно для обеспечения требуемой прочности, и размеры которой устраняют возможность неравномерного охлаждения. Самой дешевой кон-

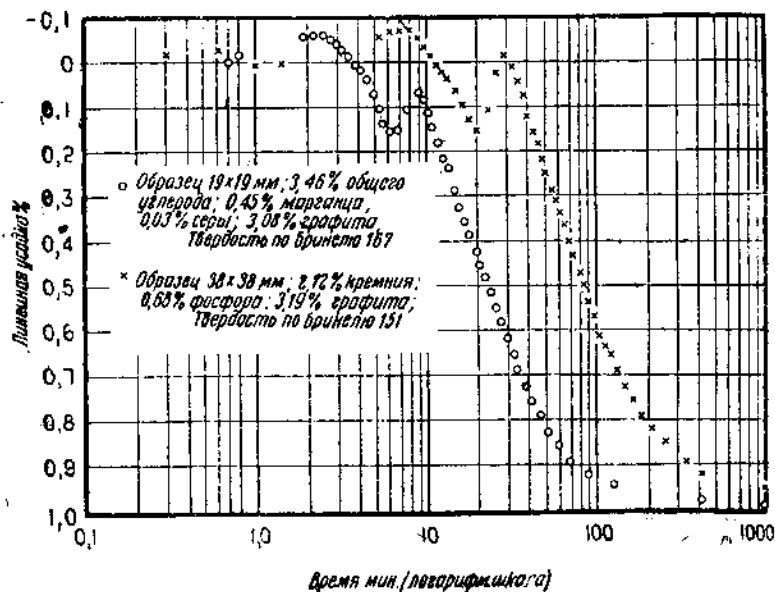


Фиг. 81. Исправление конструкции детали для уравнивания толщины стенок (Н. Bornstein)

струкцией нужно считать ту, которая представляет меньше всего трудностей и риска в производстве.

Закругления

Величина закруглений (галтелей) зависит от сплава, от формы и толщины стенок и от размеров отливки. Правильно подобранные закругления в переходах между стенками в значительной



Фиг. 82. Относительное изменение длины квадратных брусков со стороны в 19 и в 38 мм

мере способствуют уменьшению брака, вызываемого усадкой и трещинами в местах пересечения стенок (фиг. 83). В острых углах всегда следует ожидать смыва земли формы.

Радиус закруглений не должен быть слишком большим, во избежание ненужного утолщения стенок отливки.

Прямоугольные края

Наружные края тонких фланцев не следует делать под прямым углом, если можно этого избежать, особенно в отливках из белого чугуна или в таких отливках из серого чугуна, которые склонны отбеливаться в тонких сечениях. В остроугольных краях легко могут возникнуть внутренние напряжения, вызывающие трещины в отливках, в особенности в частях, расположенных около литников, т. е. там, где чугун застывает в последнюю очередь. В таких случаях можно устранить опасность трещин путем закругления краев.

Приливы и бобышки

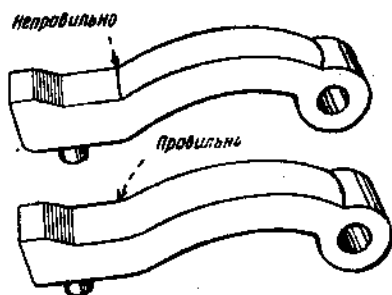
Приливы и бобышки встречаются во всех отливках и часто затрудняют формовку. Рекомендуются по возможности избегать приливов, а если таковые неустраняемы, то нужно, по крайней мере, подгонять их к толщине сопряженных с ними стенок. Если приливы или бобышки находятся на самых тонких стенках отливки, нужно принять меры против неравномерного охлаждения, например путем устройства выпора, могущего служить питателем для прилива, или простановки холодильника.

Часто приливы и бобышки располагаются на внутренних поверхностях отливки. В таких случаях нужно утолстить стенки или поставить ребра для обеспечения подвода металла из питателя (фиг. 84).

Укрепляющие ребра

Ребра применяются, главным образом, для придания жесткости и укрепления отливки вообще. Толщина ребер не должна сильно отличаться от толщины стенок самой отливки, поскольку температура заливки в значительной мере определяется толщиной самой тонкой стенки. Вместе с тем ребра, охлаждающиеся быстрее прочих частей отливки, могут вызвать напряжение в отливке и трещины, и поэтому их следует по возможности избегать.

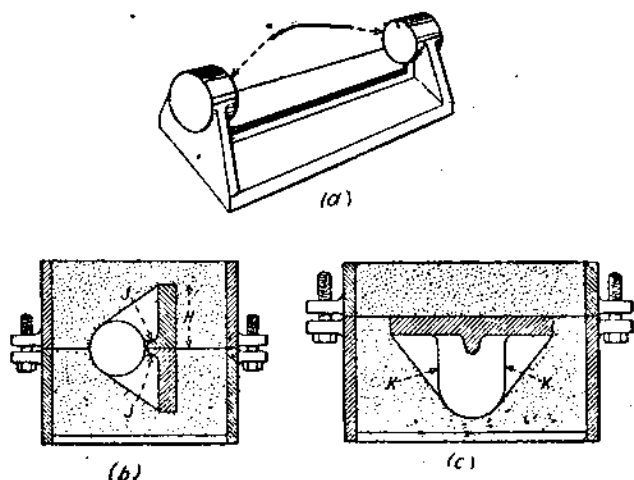
Большие плоскости, во избежание коробления при охлаждении с высоких температур, можно укреплять ребрами, хотя это зависит от общей конструкции отливки. Крестообразные ребристые сечения, показанные на фиг. 85, ни в коем случае не допускаются.



Фиг. 83. Неправильная конструкция детали (вверху). Улучшенная конструкция с плавным переходом (внизу) (Н. Bornstein)

Впадины

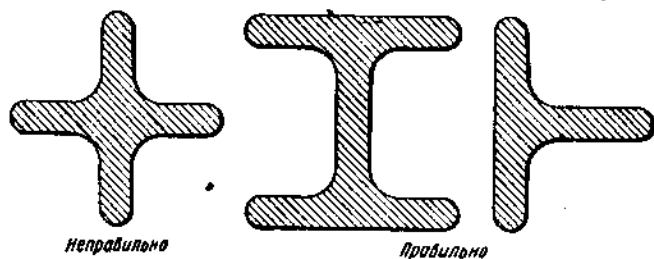
Глубоких впадин и карманов в отливке следует по возможности избегать, и в целях облегчения и упрощения формовки следует сводить стержневую работу до минимума.



Фиг. 84. Улучшенная конструкция приливов в целях упрощения формовки и улучшения питания отливки („Foundry Trade Journal“)

Отверстия

Отверстия, не требующие механической обработки, получаются в отливке при помощи стержней при разрешаемом допуске не меньше 1,5 мм на диаметр. Большие дыры, с последующей обра-



Фиг. 85. Неправильное с литейной точки зрения сечение ребер (слева), способствующее образованию усадочных раковин в толстом месте пересечения. Правильные сечения ребер (справа), устраняющие указанный недостаток

боткой, также получают посредством стержней и растачивают до требуемых размеров. В целях борьбы с усадкой в приливах часто не только желательно, но даже и необходимо предусматривать литые отверстия с последующей их рассверловкой.

Стержни

При формовке со стержнями нужно обеспечить газам возможность выхода наружу во избежание газовых раковин. Необходи-

мо также предотвратить сдвиг стержней и предусмотреть укрепление их в нужном положении. Если одних стержневых знаков для поддержки стержня недостаточно, применяют металлические жерейки. Впрочем, их следует по возможности, избегать.

Сухие стержни

По возможности следует избегать сухих стержней, прежде всего из экономических соображений.

Когда металл, окружающий сухой стержень, начинает при охлаждении давать усадку, в отливке могут образоваться напряжения и трещины, так как сухой стержень не всегда в достаточной мере поддается усадке металла. Стержни должны иметь достаточную толщину, чтобы не ломаться при переноске и установке в сушилах и в форме и противостоять действию расплавленного металла.

Сырые стержни

Где возможно, сырые стержни следует предпочитать сухим, так как первые дешевле в производстве, при очистке и т. д.

Отделка

Конструкция отливки часто оказывает очень большое влияние на стоимость ее обрубки и очистки, которая может иногда оказаться дороже самой формовки, что следует всегда учитывать при конструировании.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Кривые Ruel, Goecke и Goerens в книге „Металлография и термическая обработка чугуна и стали“. A. Sauveur, фиг. 347, стр. 365, изд. 1916. University Press Cambridge, Mass.
2. Отчет XV Комиссии Комитета А-З по испытаниям на удар Proceeding: ASTM, т. 33, ч. I, 1933.
3. J. W. Bolton, Графитовые образования в сером чугуне, „Transactions AFA“, т. 35, стр. 386, 1927, также „Die Gießerei“ № 51, стр. 1270, 1928.
4. A. Sauveur, Металлография и термическая обработка чугуна и стали, фиг. 423, стр. 438, изд. 1916, University Press, Cambridge, Mass.
5. J. W. Bolton Исследовательские проблемы в литейных серого чугуна, „Transaction: AFA“ т. 36, стр. 474, 1928.
6. E. Maurer, Диаграмма для чугуна „Kruppsche Monatshefte“ т. 5, стр. 115, VII, 1924.
7. E. Maurer и E. Holtzhausen, Диаграмма Маурера при различных скоростях охлаждения, „Stahl u. Eisen“ т. 47, стр. 1805, X, 1927.
8. E. V. Ronsberg, Несколько соображений по вопросу устройства литниковой системы и заливки, „Trans. AFA“ т. 38, стр. 41, 1930.
9. H. Lantz, K. Sipp и A. Diefenthaler, „Stahl u. Eisen“ т. 40, стр. 1141, 1920.
10. G. K. Elliott, Основная электропечь и некоторые проблемы плавки чугуна, „Proceedings Inst British Foundrymen“, т. XIV, 1920—1921.
11. C. M. Saeger, Jr и E. J. Ash, Объемные изменения в чугуне, „Trans. AFA“ т. 40, стр. 177, 1932.
12. W. F. Roesser, Потери тепла при перевозке жидкого чугуна, „Trans. AFA“ т. 36, стр. 23, 1928.
13. H. Thielmann и A. Wimmer, Внутреннее трение в жидком чугуне „Stahl u. Eisen“, т. 47, стр. 38—9, 10/III 1927.
14. R. Berger, Изменение жидкотекучести расплавленного металла и применение его в изучении железоуглеродистых сплавов, „Bulletin Officiel du Syndicat Général de fondeurs de Belgique et de l'Association Technique de Fonderie de Belgique“ No. 17, VIII, 1932.
15. W. H. Spencer, Разбор методов изучения жидкотекучести чугуна, „Trans. AFA“ т. 39, стр. 537, 1931.
16. Draht u. Sauerwald, Высококачественный чугун, стр. 156, J. Springer, Berlin 1929.
17. J. W. Donaldson, Теплопроводность чугуна изложниц, Четвертый отчет о неоднородности стальных слитков, Supplem. Vol. 4 „Journal Iron and Steel“ No. 1, 1932.

17. J. W. Donaldson, Теплопроводность серых чугунов, „Proceedings Inst. Mechanical Engrs“ № 4, стр. 953, 1928.
18. J. H. Partridge, Магнитные и электрические свойства чугуна, Carnegie Scholarship Memoirs Iron and Steel Inst., т. 17, стр. 157, 1928.
19. W. H. Hatfield, Чугун в свете новейших исследований, стр. 121, 3 изд. Ch. Griffin & Co, London 1928.
20. J. H. Partidge, Магнитные и электрические свойства чугуна, Carnegie Scholarship Memoirs Iron and Steel Inst., т. 17, стр. 157, 1928.
21. Bach-Baumann, Упругость и прочность, изд. 9.
22. J. T. Mackenzie, Испытание чугунных образцов различного диаметра, „Proceedings ASTM“, т. 31, ч. I, стр. 160, 1931.
23. A. Thum u. H. Ude, Упругость и прочность чугуна, „Die Giesserei“, т. 16, № 22, стр. 501, 31/V 1929.
24. J. B. Kommers, Усталость чугуна, т. 29, ч. II, стр. 100, 1929.
25. E. Piwowarsky, Высококачественный чугун, стр. 66, J. Springer. Berlin 1929.
26. J. W. Bolton, Исследовательские проблемы в литейных серого чугуна, „Trans. AFA“, т. 36, стр. 495, 1928.
27. Bach-Baumann, Упругость и прочность, стр. 382, 9 изд. J. Springer, Berlin.
28. H. F. Moore a. S. W. Lyon, Испытания чугуна на усталость, „Trans. AFA“ т. 35, стр. 423, 1927.
29. I. Sugimura, Упругость чугуна при нормальной и при повышенных температурах, „Soc. Mechanical Engrs of Japan“, VII, 1926.
30. J. W. Bolton, Несколько замечаний по вопросу о механизме деформаций в сером чугуне, „Proceedings ASTM“ т. 32, ч. II, стр. 477, 1932.
31. Критика R. Y. Allen a. J. W. Bolton по докладу J. W. Bolton a. Human Bornstein: „Влияние повышенных температур на некоторые механические свойства серого и ковкого чугуна“, Сборник статей о влиянии температуры на свойства металла, Am. Soc. Test. Matls in Am. Soc. Mech. Engrs, стр. 459—463, 1931.
32. J. L. Gregg, Сплавы железа с молибденом, McGraw-Hill Book Co, N. Y. City, 1932.
33. S. N. Petrenko, Зависимость между числами твердости по Роквеллу и Бринелю, Бюро стандартов США, „Technologic. Paper“ No 334, 1927.
34. W. H. Rother a. V. Mazurie, Зависимость прочности чугуна от толщины стенок, „Trans. AFA“ т. 34, стр. 746, 1926.
35. H. Bornstein, Сравнение образцов чугуна различных размеров, отличных в пяти литейных, „Proceedings ASTM“ т. 31, ч. I, стр. 154, 1931.
36. R. S. Mac Phegan, Влияние толщины стенок и состава на физические свойства чугуна, „Proceedings ASTM“ т. 29, ч. II, стр. 76, 1929.
37. J. G. Pearce, Испытание чугуна на изгиб, „Journal Iron and Steel Inst.“ т. 118, ч. II, стр. 73, 1928.
38. W. M. Pohl, Вибрации в конструкциях „Product. Engineering“ т. 4, № 3, стр. 91, III, 1-33.
39. G. S. Heydekampf, Способность заглушения вибраций, „Proceedings ASTM“ т. 31, ч. II, стр. 164, 1931.
40. J. W. Bolton a. Bornstein, Влияние повышенных температур на некоторые механические свойства серого и ковкого чугуна, Сборник статей о влиянии температуры на свойства металлов. ASTM и ASME, стр. 436, 1931.
41. H. F. Moore a. S. W. Lyon, Испытание серого чугуна на усталость при повторных нагрузках, „Proceedings ASTM“, т. 27, ч. II, стр. 87, 1927.

42. S. H. Ingberg a. P. D. Sale, Прочность на сжатие и деформация конструкционной стали и чугуна при температурах до 950°, „Proceedings ASTM“, т. 26, ч. II, стр. 33, 1926.
43. N. L. Moschel, Задание металлов при высоких температурах, „Proceedings ASTM“ т. 28, ч. II, стр. 299, 1928.
44. J. W. Bolton, Факторы, оказывающие влияние на обрабатываемость чугуна, „Machinery“, III, 1925.
45. E. J. Lowry, Обрабатываемость чугуна, „Proceedings ASTM“, т. 29, ч. II, стр. 126, 1929.
46. T. H. Wickenden, Данные об изнашиваемости и обрабатываемости чугуна, „Journal Soc. Automotive Engrs“, т. 22, № 2, II, 1928.
47. T. H. Wickenden, Обрабатываемость чугуна и стали, „Foundry Trade Journal“, т. 44, No 258, 26/II 1931.
48. Ценные свойства чугуна как машиностроительного материала, „The Foundry“, 1/V, стр. 58, 1/VI, стр. 54, 1/VI, стр. 61, 1931.
49. L. M. Sherwin a. T. F. Kiley, Высококачественный чугун, „The Foundry“, т. 59, 1/VII, стр. 45, 1931.
50. O. W. Boston, Способы испытания обрабатываемости металлов и результаты испытаний, „Trans. Am. Soc. Steel Treat“, т. XVI, No 6, 1929.
51. O. H. Lehmann, Износ чугуна при скольжении, „Gieserei-Zeitung“ т. 23, 1/XI, стр. 597; 15/XI, стр. 623; 1/XII, стр. 654, 1926.
52. E. Piwowarsky, Сопротивление фосфоритного чугуна износу, „Die Gieserei“, т. 14, 22/X, стр. 743, 1927.
53. J. E. Hurst, Изнашиваемость чугуна, Report No 38 British Cast Iron Research Assn.
54. A. L. Boegehold, Испытание чугуна на износ, „Proceedings ASTM“, т. 29, ч. II, стр. 115, 1929.
55. T. Klingenstein, Износ и состояние поверхности чугуна, „The Metallurgist“, т. 7, IX, стр. 132, 1931.
56. Kuhnle, Износ чугуна и зависимость износа от структуры и механических свойств, „Gieserei-Zeitung“ т. 24, I/X, стр. 533, 1927.
57. F. B. Coyle, График зависимости между износом чугуна и числами твердости по Бринелю, „The Foundry“ т. 59, № 9, стр. 60, 1/V 1931.
58. Ценные свойства серого чугуна, как машиностроительного материала, „The Foundry“ т. 59, № 9, стр. 58, 1/V, 1931.
59. Krohnke, Коррозия чугунных труб, „Wasser u. Gas“ т. 14, стр. 294, 1924.
60. L. A. Stenger, Корродирующее действие почвы на чугун и свинец, „Chemical and Metallurgical Engineering“ т. 22, стр. 965, 1920.
61. A. A. Bado a. V. J. Bernola, Изменения и коррозия в чугунных водопроводах, „Annales, Asociacion quimica Argentina“ т. 10, стр. 168, 1922.
62. F. N. Speller, Причины коррозии и предупреждение ее, McGraw-Hill Book Co, N. Y. 1926.
63. P. B. Bardenheuer u. K. L. Zeuеn, Влияние формы графита на растворимость чугуна в кислотах, „Mitteilungen Kais. Wilh. Inst. f. Eisenforschung“, т. II, стр. 247, 1919.
64. Михайлов, „Вестник металлопромышленности“, Москва, № 9, и 10, стр. 5, 22, 1928.
65. W. Deneske, К вопросу о химическом разъедании чугуна, „Gieserei“ т. 15, стр. 307, 1928.
66. Donaldson, Влияние хрома на чугун, „Foundry Trade Journal“ т. 40, стр. 489, 1929.

67. P. Koetschke a. E. Piwowarsky, О коррозии и ржавлении легированного и легированного чугунов „Archiv f. Eisenhüttenwesen“ т. 2, стр. 1716, 1928.
68. J. S. Vanick a. F. L. La Que, Легированный чугун в бумажной промышленности, „Paper Trade Journal“ т. 94, стр. 41, 1932.
69. M. G. Corson, Новейшие данные о сплавах железа с кремнием, „The Iron Age“ т. 120, стр. 797, 1927.
70. E. Whitaker, Высококремнистый или кислотоупорный чугун, „Foundry Trade Journal“ т. 38, стр. 189, 1928.
71. E. Piwowarsky, Высококачественный чугун, J. Springer 1929.
72. E. Valenta, Жаро- и кислотоупорные чугуны с большим содержанием хрома и углерода, Carnegie Scholarship Memoirs Iron and Steel Inst. т. 19, стр. 79, 1930.
73. E. Houdremont и R. Vasmuth, Нержавеющие и жароупорные хромистые чугуны, „Glesserei“ т. 19, стр. 322, 1932.
74. J. W. Bolton a. H. Bornstein, Влияние повышенных температур на некоторые механические свойства серого и ковкого чугуна, Сборник статей о влиянии температуры на свойства металлов ASTM и ASME, стр. 436, 1930.
75. H. F. Rugan a. H. C. H. Carpenter, Рост чугуна после повторных нагреваний, „Journal Iron Steel Inst.“ т. 80, стр. 29, 1909.
76. H. F. Rugan, Рост чугуна после повторных нагреваний, „Journal Iron and Steel Inst.“ т. 86, стр. 311, 1912.
77. J. W. Donaldson, Промышленные стали, сплавы и жароупорные чугуны, „Journal Soc. Chem. Industry“ т. 50, стр. 787, 25/IX 1931.
78. T. Kikuta, Рост чугуна при повторных нагреваниях. „Science Reports Tohoku Imperial Univ.“ т. II, стр. 1, 1922.
79. C. Benedicks a. H. Lofquist, Теория роста чугунов при повторных нагревах, „Journal Iron a. Steel Inst.“ т. 115, стр. 603, 1927.
80. J. W. Donaldson, Влияние хрома на чугун, „Foundry Trade Journal“ т. 40, стр. 489, 1929.
81. C. O. Burgess, Влияние небольших добавок хрома на качество чугуна, „Technical Publications“ No. 492, Am. Inst. Min. and Metal. Engrs, 1932.
82. J. H. Andres a. H. Hyman, Рост специальных чугунов при высоких температурах, „Journal Iron a. Steel“ т. 109, стр. 451, 1924.
83. L. M. Sherwin a. T. F. Kiley, Ваграночные высококачественные и легированные чугуны в литейных станкостроительного и штучного литья, „Trans. AFA“ т. 2, стр. 115, 1931.
84. E. Valenta, Жаро- и кислотоупорные чугуны с большим содержанием хрома и углерода, Carnegie Scholarship Memoirs Iron a. Steel Inst. т. 19, стр. 79, 1930.
85. E. Houdremont и R. Wasmuth, Нержавеющие и жароупорные чугуны с 34% Cr, „Glesserei“ т. 19, стр. 322, 1932.
86. F. K. Neath, Устойчивые против роста и образования окалины чугуны, Report No. 69, Br. C. I. R. A.
87. J. S. Vanick a. F. L. La Que, Легированный чугун в бумажной промышленности, „Paper Trade Journal“ т. 94, стр. 41, 1932.
88. J. S. Vanick a. P. D. Merica, Антикоррозийный и жароупорный никельмедистохромистый чугун „Trans. ASST“ т. 18, стр. 923, 1930.
89. A. L. Norbury a. E. Morgan, Марганцевкремнистый и никелекремнистый чугуны, „Journal Iron a. Steel Inst.“ т. 125, стр. 393, 1932.
90. R. S. Mac. Pherran a. R. H. Kreuger, Влияние длительного нагрева при 425—590° на чугун „Trans. AFA“ т. 38, стр. 826, 1930.

91. R. S. MacPherran a. J. P. Harper, Влияние отжига на чугун, „Trans. AFA“ т. 30, стр. 167, 1923.
92. P. B. Coyle, Основы термической обработки углеродистых и легированных чугунов, „Metals and Alloys“ т. 2, № 3, стр. 118, IX 1931.
93. F. J. Walls a. A. Hartwell, Термическая обработка цилиндрического и легированного чугунов, „Trans. AFA“ т. 38, стр. 859, 1930.
94. J. W. Donaldson, Термическая обработка и объемные изменения серого чугуна между 15 и 600°, „Foundry Trade Journal“ т. 39, стр. 299, 1929.
95. J. E. Hurst, Закалка чугуна в масле и на воздухе, „Foundry Trade Journal“ т. 12, стр. 4, 1930.
96. J. E. Hurst, Опыты по азотированию чугуна, „Foundry Trade Journal“ 5/V, стр. 279, 1932.
97. J. E. Hurst, Закалка чугуна, „Foundry Trade Journal“, стр. 37, 21/VII 1931.
98. R. Whitfield, Термическая обработка серого чугуна, „Foundry Trade Journal“ стр. 455, 19/VI 1930.
99. O. W. Potter, Улучшение качества серого чугуна термической обработкой, „The Foundry“, стр. 427, 1/VI 1927.
100. E. E. Marbaker, Термическая обработка серого чугуна, „The Iron Age“ т. 124, стр. 282, 2/VIII, 1929.
101. H. H. Veepu, Отжиг чугуна, „Foundry Trade Journal“ т. 40, стр. 229, 28/III 1929.
102. M. Ballay, К вопросу изучения закалки легированных чугунов на мартенсит, „Trans. AFA“ т. 40, стр. 1, 1922.
103. W. Roth, Влияние термической обработки на связанный углерод в сером чугуне, „Trans. ASST“ т. 12, стр. 27, 1927.
104. E. K. Smith a. H. C. Auferhaar, Двадцать сплавов серого чугуна, „The Iron Age“ т. 126, стр. 1583, 27/XI 1930.
105. F. A. Lorenz, Замечания по вопросу конструирования стальных отливок, „Proceedings ASTM“ т. 32, ч. II, стр. 58, 1932.
106. K. V. Wheeler, Зависимость конструкции стальных отливок от технологии производства, „Trans. AFA“ т. 40, стр. 125, 1932.
107. H. J. Rowe a. E. M. Gingerich, Влияние литейной технологии на конструкцию алюминиевого литья, „Trans. AFA“ т. 40, стр. 527, 1932.
108. L. H. Fawcett, Влияние конструкции на латунное и бронзовое литье, „Trans. AFA“ т. 40, стр. 360, 1932.
109. Необходимость сотрудничества между конструктором и технологом при конструировании литых деталей, Сборник статей по ковкому чугуну, „Proceedings ASTM“ т. 31, ч. II, стр. 374, 1931.
110. Указания по конструированию отливок из цветных металлов, Report of Nonferrous Casting Committee, „Trans. AFA“ т. 40, стр. 518, 1932.
111. Alex Taub, Зависимость конструкции отливок от технологии, „Trans. ASME“ т. 54, стр. 431, 30/VI 1932.
112. J. H. Lansing, Отливки из ковкого чугуна, их конструкция и физические свойства, „Journal Western Soc. Engrs“ т. 37, No 2, IV 1922.
113. H. V. Shepherd, Конструкция с точки зрения производства, „Machine Design“ т. 4, стр. No 15, XIII 1932.
114. E. R. Young, Конструирование стальных отливок, „Machinery“ т. 24, V и VI, стр. 701, 790.
115. C. R. Delbart, Закалка чугуна на мартенсит, „Trans. AFA“ т. IV, No. 3, VII 1933.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора	3
I. Введение	5
Определения	6
Исторический обзор	7
Производство отливок	—
Конструирование	—
Формовка	8
Изготовление стержней	—
Плавка чугуна и разливка в формы	—
Выбивка и очистка	10
II. Металлургия литейного чугуна	—
Нормальные элементы чугуна	—
Формы углерода	—
Факторы, влияющие на свойства чугуна	11
Влияние углерода	12
Влияние кремния	14
Влияние марганца	15
Влияние серы	16
Влияние фосфора	17
Структурные составляющие	18
Природа структурных составляющих	24
Влияние массы и термических условий получения чугуна на его структуру	—
Масса	28
Термическая история чугуна	29
Прочие факторы, влияющие на структуру	—
Легированные (специальные) чугуны	—
Никелевый чугун	32
Хромистый чугун	35
Хромоникелевый чугун	36
Молибденовый чугун	38
Ванадиевый чугун	39
Чугун с добавкой меди, титана и алюминия	41
III. Свойства чугуна	—
Обзор свойств	43
Физические постоянные (коэффициенты)	—
Температурные интервалы плавления и затвердевания	149

Удельная теплоемкость	45
Жидкотекучесть	46
Объемные изменения в отливке	—
Удельный вес	48
Коэффициент линейного расширения	—
Поверхностное натяжение	—
Теплопроводность	49
Электросопротивление	50
Магнитные свойства	51
Механические свойства	52
Соппротивление разрыву	—
Коэффициент сопротивления изгибу	53
Соппротивление сжатию	57
Соппротивлению срезу	58
Кручение	—
Предел усталости	59
Упругость, пластичность, жесткость	61
Соппротивление удару	65
Крип (ползучесть)	70
Твердость	71
Влияние толщины стенок	72
Способность затухания вибраций	76
Акустические свойства	78
Влияние повышенных температур	—
Влияние низких температур (ниже 0°)	84
Рост чугуна	85
Обрабатываемость чугуна	88
Соппротивление чугуна износу	93
Соппротивление коррозии	96
Жароупорность чугуна	106
IV. Классификация и технические условия	116
Проект спецификации А-48-32Т американского общества испытания материалов (ASTM)	116
Другие спецификации ASTM	118
V. Термическая обработка	119
Отжиг	—
Уничтожение внутренних напряжений	—
Смягчение чугуна для улучшения обрабатываемости	—
Отжиг белых и половинчатых чугунов для получения высококачественного серого чугуна	122
Закалка и отпуск	123
Азотирование	124
VI. Белые и закаленные чугуны	125
Общее	—
Термическая обработка	127
Твердость	128
Влияние легирующих элементов на отливки из закаленного и белого чугуна	—

VII. Сварка	130
Газовая сварка	—
Сварка помощью чугуновых прутков	—
Сварка бронзо	132
Электросварка	133
VIII. Главнейшие литейные факторы в производстве чугунового лития	136
Сотрудничество конструктора и технолога	137
Уклоны на моделях	—
Припуски на усадку	—
Припуски на механическую обработку	138
Разъем	139
Питание отливки	—
Толщина стенок	—
Закругления	140
Прямоугольные края	141
Приливы и бобышки	—
Укрепляющие ребра	—
Впадины	142
Отверстия	—
Стержни	—
Сухие стержни	143
Сырые стержни	—
Отделка	—
Библиография	144

БИБЛИОТЕКА
Академии Наук

Редактор Н. И. Фейгин.

Технический редактор К. М. Шалимова

Сл. по в производство 23/VI—35 г.

Подписано в печать 13/XII—35 г.

Изд. № 42. Индекс МЧ—45—5—3.

Уполномоченный Главлита В—29725

Формат 62×94. Объем 9,5 печ. лист. Тираж 3000, -ПР. ТКК № 114. Нар. 3271

8 Типография „Мособлполиграф“ Москва, ул. Фридриха Энгельса, 46.