



Structure and mechanical properties of gray, malleable, white and high-duty cast iron after deformation in hot conditions by smithing, stamping, extrusion and rolling are considered. Influence of hot plastic deformation of castings on the following phase change in the structure of cast iron is shown.

Л. Р. ДУДЕЦКАЯ, А. И. ПОКРОВСКИЙ, ФТИ НАН Беларуси,
И. С. ГАУХШТЕЙН, М. И. ДЕМИН,
П. С. ГУРЧЕНКО, РУП "Минский автомобильный завод"

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЧУГУНОВ, ДОСТИГАЕМЫЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ОТЛИВОК

УДК 621.7.016.2:669.13

Работы по получению чугунов с повышенными свойствами проводятся в нескольких направлениях: совершенствование традиционной технологии выплавки, легирования, печного и внутриформенного модифицирования, позволяющее достигнуть показателей прочности 600—800 МПа; термическая обработка чугуна, позволяющая получить предел прочности до 1000 МПа при относительном удлинении до 10%. Дальнейшее повышение свойств чугуна тормозят недостатки традиционных технологий — нестабильное качество литья, низкий выход годного литья (0,5—0,7). Развитие технического прогресса требует поиска новых нестандартных вариантов воздействия на форму и структуру чугуна.

Определенный интерес вызывает горячая пластическая деформация чугуна. Ее использование опровергает мнение, что единственным способом формообразования чугуна является литье. Анализ результатов многочисленных исследований доказывает, что в определенных интервалах температурно-силовых воздействий чугун служит деформируемым материалом, причем возможно трансформировать как весь объем, так и поверхностные слои металла. Кроме того, имеются данные о значительном повышении свойств чугуна после деформации.

Серый чугун. В первых опытах серый чугун удалось пластически деформировать только в медной оболочке [1]. Затем его прессовали в оболочке из стали при температуре 850—1050°C и степенях деформации до 70%. Для получения максимального предела прочности (σ_b) рекомендуется температура 1050°C и обжатие 50—55%. После объемной штамповки со степеню деформации до 70% свойства серого чугуна повышаются: σ_b при осадке — от 500 до 840 МПа, пластичность — от 5 до 20 % (в 4 раза). Потолок механических свойств у всех типов чугунов после деформации примерно одинаков и соответствует свойствам сталей.

Прокатка СЧ35 дала прирост σ_b от 300 до 1200 МПа, σ_r — от 0 до 700 МПа, относительное удлинение (δ) — от 0,5 до 5%, твердость (НВ) —

от 225 до 320 кг/мм², модуль упругости ($E \cdot 10^{-3}$) — от 150 до 190 МПа, пределы выносливости при изгибе — от 100 до 400 МПа, при растяжении-сжатии — от 40 до 280 МПа. Рост происходит до укова 2,0—2,5 и стабилизируется, что объясняется вытягиванием включений графита, принимающих игольчатую равнонаправленную форму, уменьшая вредное влияние графита на металлическую основу, и измельчением зерен металлической основы благодаря рекристаллизации.

При прессовании труб из серого чугуна предел прочности при растяжении достиг 120 МПа, при изгибе — 480 МПа [2]. Замедление скорости деформации повышает пластичность, что связано с более полным протеканием разупрочняющих процессов. В продольном направлении σ_b возрастает в 1,2—2,0 раза. При нагружении первые микротрещины появляются в пластинках графита. Начало пластического деформирования в матрице сопровождается появлением едва заметных полос скольжения у концов включений графита, имеющих трещины.

Стадии изменения микроструктуры следующие: со степени 5—10% меняется исходная равноосная форма эвтектического зерна, после 20% происходит снижение завихренности, вытягивание включений и некоторое уменьшение толщины, после 25% уменьшается размер зерна в плоскости, параллельной деформации, далее зерна приобретают вид сплюснутых дисков, способствуя возникновению устойчивой волокнистой структуры.

Таким образом, несмотря на неблагоприятную форму графита, серый чугун может успешно подвергаться пластической деформации, хотя и с определенными ограничениями. Наилучший способ деформирования — прессование или выдавливание с небольшой скоростью. При этом может быть достигнута степень деформации 70%. Прочностные свойства повышаются до 3 раз (максимально полученный $\sigma_b = 120$ кг/мм²), пластические свойства увеличиваются незначительно.

Белый чугун. Его главная проблема — пониженная пластичность, обусловленная аустенитно-

цементитной эвтектикой - ледебуритом, пластичная фаза которого (аустенит) расположена в малопластичном карбиде железа; в доэвтектическом чугуна ледебурит кристаллизуется в межветвиевых и междендритных участках, образуя хрупкую оболочку вокруг первичного аустенита. Излом литого чугуна — крупнокристаллический с признаками транскристаллизации. Отдельные фасетки цементита достигают 2—3 мм². Трещины проходят как через кристаллы эвтектического цементита, так и по перлитным зернам. Послековки при 900—950°С ледебурит исчезает, микроструктура однородная (перлит и цементит, 430 НВ). Излом мелкозернистый, подобен излому стали. Благодаря разрушению карбидного каркаса, дроблению и деформации цементита доля эвтектического цементита в изломе значительно уменьшается, а протяженность его участков не превышает 20—25 мкм. Вторичный цементит после охлаждения выделяется в зернистой форме и почти не ослабляет матрицу. Размер перлитных зерен в ковном чугуна намного меньше как в результатековки, так и из-за возрастания количества зародышевых центров при перлитном превращении. Все это приводит к повышению механических свойств [3].

Стадии трансформации структуры: вначале осидендритов несколько разворачиваются в направлении течения, а сетка эвтектики приобретает удлиненную форму, постепенно ее участки разрываются, приобретая строчечное строение. В поперечном сечении до укова 2 изменения не происходят, при укове 5—6 матрица состоит из дисперсного перлита с равномерно распределенными мелкими карбидными частицами. После деформации в продольном направлении: σ_b при растяжении возрастает от 300 до 940 МПа (в 3 раза), ударная вязкость — от 20 до 240 кДж/м².

За счет горячей пластической деформации улучшали σ_b при разрыве от 200 до 800—1200 МПа, δ — до 4%, ψ — до 8 %, ударную вязкость — до 300 кДж/м², а отношение σ_t / σ_b — до 0,75 — 0,82.

Испытания на растяжение предварительно деформированного белого чугуна в режиме сверхпластичности (при температуре 650°С и скорости деформирования 1%/мин) показали, что для чугуна с 2,13% С δ составляет 526 %, а для чугуна с 2,3% С — 291%. При комнатной температуре предел текучести увеличился (по сравнению с литым) от 550 до 1050 МПа, относительное удлинение — от 0 до 2% [4].

Испытания предварительно деформированного чугуна при 900°С показали возможность его закручивания до 360° (на два витка).

Оптимальной температурой деформации белого чугуна считается 1000—1100°С. Перед деформацией использовали следующую предварительную термообработку: нагрев до 1080°С (2 ч) и охлаждение с печью до 1050°С. Пластичность повышается при содержании кремния не более 0,4 % и

соотношении количества марганца к сере более 1,5. Рекомендуется состав с повышенной пластичностью: 2,2% С, 0,4% Cr, 0,2% V, 0,2% Mo, 0,2% Ni, 0,3% Mn, 0,4% Si. Для большего повышения пластичности предлагается следующая термообработка: нагрев до 1140°С (выдержка 30 мин), охлаждение с печью до 600°С (выдержка 15 мин), нагрев до 1050°С (выдержка 15 мин), нагрев до 1100°С и деформация.

С увеличением степени деформации механические свойства повышаются; до величины укова 4 сохраняется прямая зависимость показателей, затем их рост незначителен.

Резкое увеличение пластичности обеспечивает легирование белого чугуна карбидообразующими элементами Cr, W, Mo, V, Nb, Ti, приводящее к замене ледебурита эвтектиками на базе специальных карбидов: Me₇C₃, Me₆C, Me₂C, MeC, в которых матричной фазой служит пластичный аустенит. В процессе длительной выдержки этих сплавов при температурах на 40—120°С выше точки A_c происходит распад эвтектического цементита с образованием мелких равноосных кристаллов карбидов ванадия. Для ускорения процесса рекомендуется предварительная термоциклическая обработка, дробящая эвтектическую сетку и повышающая пластичность.

Развитие идеи получения в белом чугуна инвертированной структуры (в вязкой матрице - изолированные твердые включения) предложено для белого чугуна. С помощью математического планирования оптимизирован состав: С—2,24%, Si—0,56, Mn—0,56, P—0,026, S—0,016, Cr—1,11, Mo—0,30, Ni—0,29, V—0,46, Nb—0,36, Ti—0,027%, дающий требуемую структуру и обеспечивающий после деформирования $\sigma_b = 890$ —1100 МПа, $\sigma_t = 620$ —820 МПа, $\delta = 1$ —4%, ударную вязкость — 50—400 кДж/м², HRC—33—42.

Прокатка с высокой степенью обжатия (более 95%) очень сильно влияет на свойства белых чугунов. Относительное удлинение достигает 8% при ударной вязкости более 100 кДж/м², поэтому предложено изготавливать дробильные шары ковкой непрерывнолитых заготовок из белого чугуна, содержащего 1,8—2,5% С, 10—30% Cr, 1% Mo.

Повышает пластичность белого чугуна предварительная тепловая обработка (многократные нагревы и охлаждения), приводящая к росту плотности дислокаций в карбидах (до 10⁶—10⁷ мм⁻²) и созданию полигональной структуры. На первых этапах создается сеть границ и субграниц в аустените. Под давлением по этим границам происходит разделение карбидов на части.

Предлагается способ повышения пластичности белых чугунов, использующий фазовые превращения в эвтектиках, для чего необходимо получение метастабильного цементита M₃C, достигаемое при определенной схеме легирования чугуна. При нагреве и деформации метастабильный цементит

способен распадаться с выделением более устойчивых фаз, в том числе карбидных. Следствием является нарушение сетки эвтектических карбидов и повышение пластичности сплава в целом в 2—5 раз.

Таким образом, перспективность применения деформации к белым чугунам объясняется их высокой износостойкостью и твердостью. В результате деформации возрастают прочность (до 1200 МПа), ударная вязкость (до 40 Дж/см²), а износостойкость остается на прежнем высоком уровне. Основным недостатком белого чугуна при деформации (пониженная пластичность) может быть устранен предварительной термообработкой или экономным легированием. Опробованные области применения деформированного белого чугуна: прокатные валки, размольные шары, сортовой прокат.

Высокопрочный чугун. После деформации ковкой или выдавливанием происходит изменение формы графита в направлении вытяжки от сфероида до игольчатой, причем графит по сечению поковки деформируется неравномерно: наряду с толстыми иглами присутствуют тонкие волосяные прожилки. На поперечных шлифах графит сохраняет округлое сечение, вместе с крупными сфероидами встречаются средние и мелкие, а также графитная пыль. Ферритный чугун после деформации имеет по 50% феррита и перлита, что обусловлено фазовой перекристаллизацией. После деформации прокаткой или штамповкой сфероид превращается в двояковыпуклую чечевицу с вытянутыми по краям усами, в поперечном направлении форма чечевицы более округлая. В металлической матрице создается текстура деформации, ферритные оторочки следуют за графитом и вытягиваются в полосы. Зерно уже при уковке 2 резко измельчается, происходит и рекристаллизация с образованием более равномерной, чем в литом, и равноосной структуры. В продольном направлении прочностные характеристики высокопрочного чугуна после деформации возрастают в 1,5—2,0 раза, δ снижается в 2 раза, ударная вязкость не меняется. В поперечном направлении прочность и пластичность уменьшаются. Характер изменения свойств—резкое повышение до степени деформации 50%, затем рост замедляется [5].

При прессовании труб графит приобретает форму сплюснутых веретен, вытянутых в продольном сечении. При больших деформациях графит превращается в длинные плоские ленты, что снижает механические свойства, поэтому рекомендуется получать в заготовках графит диаметром до 30—60 мкм. Трубы, изготовленные из чугуна, имеющего в своем составе 3,7% С и 2,1% Si, после деформации имеют следующие механические свойства: предел прочности при растяжении — 520 МПа, при изгибе — 790 МПа, относительное удлинение — 1,2 %, ударная вязкость — 150 кДж/м².

Несмотря на резкое ухудшение формы графитных включений, σ_b и σ_T увеличиваются как в продольном, так и в поперечном направлениях. Модуль упругости чугуна после деформации с малыми степенями больше, чем у литого, что связано с залечиванием при прокатке микродефектов структуры. При дальнейшем повышении степени деформации значения модулей упругости убывают, что связано с изменением формы графита от компактной к пластинчатой. При ковке деформация в поковке распределена неравномерно: при расчетной степени деформации 50% истинная степень деформации в разных местах поковки колеблется от 15% (в центре) до 80% (на поверхности). Перлит после деформации становится более однородным, разница между минимальными и максимальными значениями микротвердости уменьшается.

Плотность деформированного чугуна возросла от $7,1 \cdot 10^{-3}$ до $7,4 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, что объясняется понижением макро- и микронеоднородностей за счет устранения пор, раковин и других литейных дефектов. Предел прочности при изгибе возрастает от 1000 до 2250 МПа, допустимая пластическая деформация при осадке — от 3 до 27%, износостойкость (по сравнению с литым термообработанным) увеличивается в 1,6—2,0 раза, ударная вязкость — от 170 до 780 кДж/м². Упрочнение связано с создаваемым особым мозаичным строением зерен [6].

Предложена идея определения уровня деформируемости графитовых включений методом координатных сеток 2×2 мм и стереологического анализа с использованием автоматических численных анализаторов структуры [7].

Таким образом, перспективность применения деформации к высокопрочному чугуну с шаровидной формой графита вызвана его наилучшей пластичностью по сравнению с другими классами и существенным приростом механических свойств после деформации.

Ковкий чугун. Максимальную пластичность ковкий чугун имеет при температуре 1000°C (ψ при растяжении — 25%, максимальная степень деформации при осадке — 5%). Пластичность ковкого чугуна в горячем состоянии в 1,4—1,8 раза больше, чем серого чугуна. Ковкий чугун может обрабатываться при температуре 850—1000°C путем профильной прокатки (обжатие до 70%), открытой прокатки (до 65%), штамповки (до 65 %) [8].

Таким образом, ковкий чугун, превосходя серый по деформируемости и прочностным свойствам и незначительно уступая по этим показателям высокопрочному чугуну, является весьма перспективным материалом для обработки давлением.

Влияние предварительной горячей деформации на последующие фазовые превращения. Впервые предположение об ускорении графитизации после горячей пластической деформации высказано и

подтверждено для белого чугуна [3]. Послековки и охлаждения на воздухе в структуре наблюдалось присутствие графита в значительно большем количестве, чем у образцов, отожженных при температурековки, но осадке не подвергаемых. Причем с ростом степени деформации количество графитных включений увеличивается, следовательно, сокращается время отжига [8].

Таким образом, деформация, повышая плотность дислокаций и внося несовершенства в макро- и микроструктуру металла, ускоряет протекание последующих фазовых превращений и является еще одним фактором, позволяющим влиять на окончательную структуру и свойства.

Полученные данные использованы для разработки на базе Минского автомобильного завода технологии получения шестерен главной передачи заднего моста автомобиля МАЗ 5551.

Выводы

1. В зависимости от формы графитных включений лучше всего деформируется чугун с шаровидной формой, далее с компактной (ковкий чугун), хуже всего с пластинчатой. Белый чугун, в котором весь углерод находится в виде цементита, может успешно подвергаться деформации, но у него высокое сопротивление деформации. Металлическая матрица чугуна в виде перлита по сравнению с ферритной быстрее превращается в однородный аустенит при нагреве до температуры деформации. Поэтому в производственных условиях при использовании скоростного (индукционного) нагрева и ограниченных выдержек перлитный чугун пластичнее ферритного и допускает большую степень деформации.

2. Кроме придания детали точной формы, деформация существенно повышает механические свойства чугуна. Повышение свойств может дости-

гать 2–3 раз и зависит от температурно-силовых условий деформации. Максимальные прочностные свойства после деформации наблюдаются у высокопрочного чугуна (σ_b — до 1300–1400 МПа, σ_t — до 900–1000 МПа, δ — до 10%). Максимальная стойкость в условиях абразивного и ударно-абразивного износа — у белого чугуна. Причины упрочнения после деформации — залечивание пор, раковин и других литейных дефектов, формирование мелкозернистой однородной матрицы и изменение формы графитных включений.

3. В качестве предварительной термообработки для повышения пластичности, снятия внутренних напряжений, распада свободного цементита и получения перлитной структуры рекомендуется нормализация. Перспективно использование термоциклической обработки. Окончательная термообработка (нормализация, закалка с отпуском) приводит к дальнейшему существенному повышению свойств деформированного чугуна. Особенно перспективна изотермическая закалка деформированного чугуна с получением аустенитно-бейнитной структуры.

Литература

1. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М.: ИЛ, 1955.
2. Иванов В. Г., Шиян В. Г. Прогрессивная технология производства чугунных труб. М.: Машиностроение, 1969. Гл. 6. С. 126–150.
3. Погодин-Алексеев Г. И. // Вестник машиностроения. 1951. № 4. С. 57–60.
4. Wadsworth J., Sherby O. D. // Foundry manag and technol. 1978. N 10. P. 59–64.
5. Унксов Е. П., Бережковский Д. И. // Вестник машиностроения. 1953. № 12. С. 29–35.
6. Мурач В. С., Храмченков А. И. и др. // Литейное производство 1980. № 5. С. 16–17.
7. Белов А. Х., Клейнер М. К. и др. // Совершенствование производства технологического оборудования. 1987. Вып. 62. С. 55–61.
8. Губкин С. И., Юшков А. В. и др. // Сб. науч. тр. Физ.-техн. ин-та АН БССР. Мн.: Изд-во АН БССР, 1955. Вып. 2. С. 3–15.