



*The schemes of bainite reaction for cast iron are given. The different factors having an influence on structure formation are described. The concrete modes of heat treatment of gear out of cast iron for bainite in conditions of MAZ are offered.*

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

## ТЕРМООБРАБОТКА НА БЕЙНИТНУЮ СТРУКТУРУ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЧУГУНА

УДК 621.78 : 539.52 : 669.13

Благодаря тому что чугун, представляя собой многофазную и многокомпонентную систему, фазовый состав которой можно целенаправленно регулировать, позволяет получать широкий спектр состояний структуры и свойств, он занимает одно из ведущих мест среди современных машиностроительных и конструкционных материалов. Однако потенциальные возможности чугуна, реализуемые с помощью термической обработки, до сих пор раскрыты не в полной мере. Используя специальную термическую обработку, можно существенно расширить область применения чугуна для ответственных и высоконагруженных деталей машин. Одним из вариантов термической обработки, позволяющей получить сочетание высоких прочностных, пластических и эксплуатационных свойств, является изотермическая закалка чугунов на аустенито-бейнитную структуру. Положительное качество изотермической закалки состоит в том, что она вызывает меньше деформаций, чем другие виды термообработки.

Схема бейнитной реакции для чугунов. При температуре 550°C образование  $\alpha$ -фазы и перлитное превращение в целом в чугунах, как и в сталях, замедляется из-за затухания прекращения диффузии железа и легирующих элементов. Диффузионная подвижность углерода остается достаточно высокой. Поэтому зарождение и рост карбидной фазы продолжают вплоть до 400°C. Ниже 400°C выделение карбидной фазы резко замедляется в связи со снижением скорости диффузионных подвижек углерода. При температуре 350°C начинается образо-

вание зародышей  $\alpha$ -фазы, структурно не связанных с карбидом (мартенситное превращение).

Для белого чугуна в работе [1] описана схема бейнитной реакции (рис. 1). Кристаллы  $\alpha$ -фазы возникают вдоль определенных плоскостей аустенита и имеют форму, близкую к равноосной (рис. 1, а). Происходящее перераспределение углерода обогащает углеродом окружающий аустенит, который при закалке образцов не претерпевает мартенситного превращения. Наиболее сильно обогащаются углеродом участки аустенита, разделяющие частицы  $\alpha$ -фазы в цепочках. Здесь выделяются мельчайшие кристаллы карбидов, а  $\alpha$ -частицы прорастают сквозь обедненный углеродом аустенит до сочленения в пластины (рис. 1, б).

С понижением температуры кристаллы  $\alpha$ -фазы возникают в большем количестве в виде набора тонких параллельных пластин (рис. 1, в). Тонкие участки аустенита между пластинами сильно обогащены углеродом. В них наиболее облегчено выделение частиц карбидов.

Режимы термообработки чугуна на бейнит и факторы, влияющие на формирование структуры. Термическая обработка чугуна на бейнитную структуру включает в себя следующие этапы: нагрев чугунной отливки до температуры аустенизации и выдержку при этой температуре; охлаждение со скоростью, обеспечивающей стабильность аустенита до температуры изотермического превращения; выдержку при температуре изотермического превращения аустенита; охлаждение до комнатной температуры.

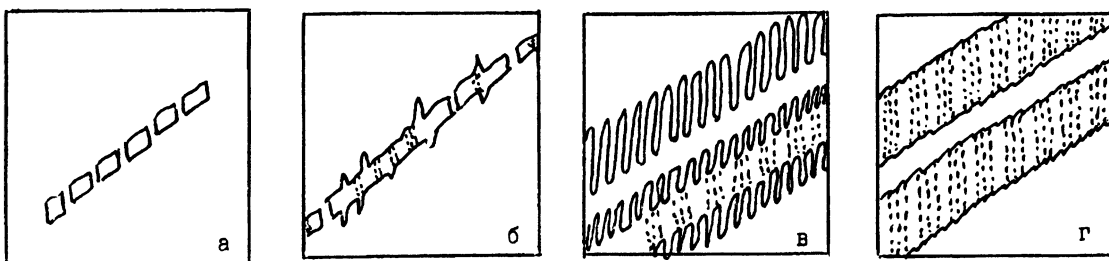


Рис. 1. Схема бейнитной реакции для белого чугуна [1]

Конечную структуру и свойства бейнитного чугуна определяет совокупность следующих факторов: химический состав, температура и продолжительность аустенизации, скорость охлаждения до температур промежуточного превращения, температура и продолжительность изотермической выдержки.

**Химический состав.** В отличие от стали, где бейнит представляет собой смесь игольчатого феррита и карбидов, в чугуне повышенное содержание кремния подавляет распад аустенита, в результате чего структура чугуна после изотермической закалки состоит из смеси игольчатого феррита и аустенита [2]. У высокопрочного чугуна снижение содержания кремния с 2,88 до 1,57 % уменьшает ударную вязкость в 4 раза из-за снижения количества остаточного аустенита. Влияние других легирующих добавок на протекание бейнитного превращения [3] состоит главным образом в увеличении максимального количества остаточного аустенита и смещении этого максимума в сторону больших выдержек.

Действие марганца в бейнитных чугунах проявляется двояко: с одной стороны, он улучшает прокаливаемость, облегчая образование бейнитной структуры, с другой — обладая высокой склонностью к ликвации на границах зерен, увеличивает неоднородность структуры и снижает механические свойства чугуна. Поэтому для получения высокой пластичности содержание марганца не должно превышать 0,3 %.

Установлена следующая зависимость минимальной продолжительности изотермической выдержки ( $\tau_{\min}$ ) от концентрации легирующих элементов [3]:

$$\lg \tau_{\min} = 0,8 + 1,45\% \text{ Si} + 0,9\% \text{ Mn} + 0,55\% \text{ Mo} + 0,33\% \text{ Cu} + 0,15\% \text{ Ni}. \quad (1)$$

Другие легирующие элементы [3—7] вводятся в основном для повышения прокаливаемости, обеспечивающей при изотермической закалке гарантированное получение бейнитной структуры. В нелегированных высокопрочных чугунах требуемую структуру можно получить в пробах диаметром до 30 мм [8]. Небольшие добавки молибдена или молибдена и никеля, либо молибдена и меди облегчают получение необходимого переохлаждения.

**Температура и продолжительность аустенизации** зависят от исходной структуры сплава. Чем выше температура, тем быстрее происходит выравнивание содержания углерода в аустените и сокращается время выдержки. Температура изотермического превращения должна быть близкой к верхней границе образования нижнего бейнита, которая зависит от содержания углерода в аустените [4]. Однако при температурах выше 950°C возрастает опасность окисления по границам зерен, роста графитовых включений, увеличения количества остаточного аустенита, что сопровож-

дается снижением прочности. При температурах ниже 900°C образуется обедненный аустенит и требуются длительные выдержки для его предельного насыщения углеродом. При перлитной структуре насыщение аустенита углеродом достигается за 20—30 мин, при ферритной — за 1,5—2,0 ч. Температура аустенизации чугуна с шаровидным графитом находится в пределах 850—950°C, так как при более высоких температурах пластические свойства чугуна падают [4].

**Скорость охлаждения** чугуна до температуры изотермического превращения должна исключать образование перлита. Для этого используют масляные и соляные ванны с температурой около 180°C и в отдельных случаях сжатый воздух. Скорость охлаждения высокопрочного чугуна в соляной ванне рассчитывается [4] по формуле:

$$\log v = 9,41 - 1,56 \log D - 2,54 \log T_n, \quad (2)$$

где  $v$  — скорость охлаждения, °C/с;  $D$  — диаметр образца;  $T_n$  — температура соляной ванны, °C.

**Температура** изотермического превращения оказывает существенное влияние на структурообразование чугуна, которое протекает в две стадии. На первой стадии происходит выделение и рост ферритных пластин, сопровождающееся повышением концентрации углерода в аустените, максимум устойчивости которого наблюдается при 1,6 % углерода. На второй стадии устойчивость аустенита начинает падать и происходит его распад на феррит и карбиды.

При более высокой температуре изотермической выдержки (выше 400°C) образуется крупноигольчатая структура (верхний бейнит) с минимальным количеством остаточного аустенита. При температуре ниже 400°C образуется мелкодисперсная структура (нижний бейнит) с большим содержанием остаточного аустенита. Такой чугун используется в автомобилестроении для зубчатых колес трансмиссий. Он имеет следующие свойства: предел прочности при растяжении — 1540—1660 МПа, предел текучести при растяжении — 973—974 МПа, относительное удлинение — 1—2 %, ударная вязкость — 40—50 Дж/см<sup>2</sup>, твердость — 360—380 НВ. Если превращение аустенита прервать и произвести закалку, твердость составит 450—500 НВ.

При температуре ниже 300—350°C часть остаточного аустенита распадается на мартенсит. Таким образом, как превышение, так и снижение оптимальной температуры изотермической выдержки приводит к снижению пластических свойств чугуна. Продолжительность изотермической выдержки определяется скоростью протекания диффузионных процессов и рассчитывается опытным путем в зависимости от химического состава чугуна.

Зависимость механических свойств зубчатых колес из высокопрочного чугуна марки ВЧ-60 от температуры изотермической выдержки рассмотрена в [9]. Аустенизацию проводили при нагреве до температуры 900°C в соляной ванне с изотер-

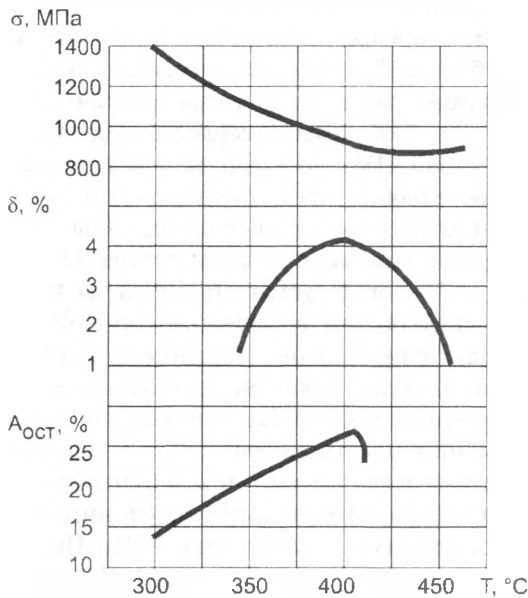


Рис. 2. Зависимость механических свойств чугуна ВЧ-60 от температуры выдержки в закалочной ванне [9]. Температура аустенизации 900°C

мической выдержкой 2 ч. На рис. 2 заметна четкая связь роста пластичности с увеличением количества остаточного аустенита. Максимальные значения пластичности получаются при температуре изотермической выдержки 400°C и содержании остаточного аустенита 27,5 %. В случае повышения температуры закалки максимальные показатели свойств сдвигаются в сторону более низких температур. В практике машиностроения необходимо компромиссное сочетание между прочностью и пластичностью. Поэтому для зубчатых колес рекомендован [9] следующий режим изотермической закалки: аустенизация при 950°C, выдержка 3,5 ч, охлаждение до 300°C в основании зуба при температуре ванны 180°C, выдержка 2 ч при 300°C. При этом количество остаточного аустенита в профиле зуба — 10 %, предел прочности при растяжении — 810 МПа.

**Проведение термообработки деталей из высокопрочного чугуна на бейнит в условиях Минского автомобильного завода.** На Минском автомобильном заводе в 1999—2000 г. проводили работы по термообработке высокопрочного чугуна на бейнитную структуру. В качестве деталей представителей выбраны две шестерни главной передачи заднего моста автомобиля МАЗ-5551: ведущая — 5551-2402017 и ведомая — 5551-2402060 (рис. 3).

Плавку высокопрочного чугуна проводили в электродуговой печи емкостью 3 т сталелитейного цеха № 2 РУП "МАЗ". Чугун имел следующий химический состав (мас. %): углерод — 2,8—3,2, кремний — 1,7—2,4, марганец — 0,3—0,7, никель — 0,25, медь — 0,2, сера — до 0,03, фосфор — до 0,1, остаточный магний — до 0,03. Исходная структура в литом состоянии по ГОСТ 3443-87

представляла собой ферритно-перлитный высокопрочный чугун: ШГФ5-ШГФ4-ШГ4-ШГд25-ПТ1-П70 (НВ 280). После отжига, проводимого для снижения твердости перед механической обработкой, доля перлита в чугуне уменьшалась до 20% и твердость составляла 220 НВ.

Термическую обработку отливок на бейнит производили в термическом отделении инструментально-штампового производства МАЗа, где имелся широкий выбор соляных и селитровых ванн и электропечей. Необходимо было подобрать две близко расположенные ванны (соляную и селитровую) с высокой и низкой температурами. При этом оказалось, что нагрев в соляных ваннах, применяемый за рубежом, на МАЗе не может быть осуществлен. Массивные шестерни (в отличие от маленьких образцов, на которых проводили предварительные эксперименты) при переносе из соляной (высокотемпературной) в селитровую (низкотемпературную) ванну перетаскивали на своей поверхности большое количество налипающей соли, загрязняя расплав селитры, что по достижении определенных концентраций могло привести к взрыву.

Поэтому для нагрева под аустенизацию использовали электропечь с окислительной атмосферой мод. Н-519 и рядом расположенную селитровую ванну мод. Н-2334. Из-за окислительной атмосферы в печи и возможного окисления поверхности деталей во время выдержки ее продолжительность была сокращена до 0,5—1,0 ч по сравнению с рекомендуемыми [9] для полноты прохождения процесса аустенизации 3—4 ч.

Для устранения поводок шестерен и уменьшения окисления поверхности была спроектирована и изготовлена специальная оснастка. Она представляла собой цилиндрические короба (по одно-

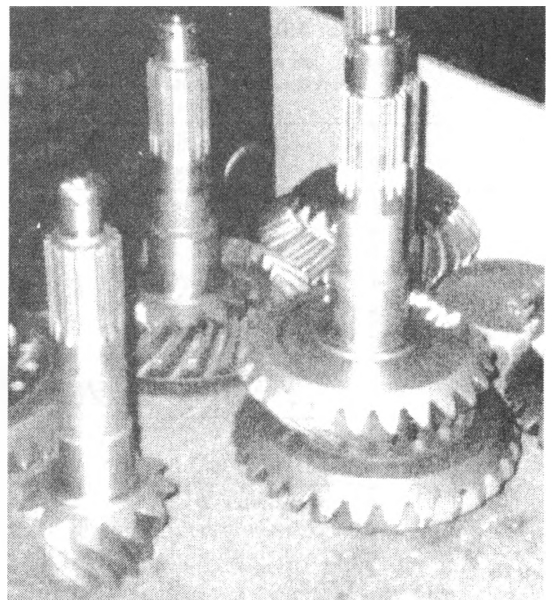


Рис. 3. Шестерни главной передачи заднего моста автомобиля МАЗ-5551, изготовленные из бейнитного высокопрочного чугуна

му на каждую деталь) с массивным плоским основанием и легкими боковыми стенками, в которые вертикально устанавливали шестерни, а их зубчатый венец присыпали древесным углем или песком. В дальнейшем при выполнении работ от использования оснастки отказались из-за пригорания покрытия и усложнения манипуляций с загрузкой и выгрузкой деталей. В окончательном варианте детали загружали в печь и ванну подвешенными вертикально на крюке. Последующие обмеры шестерен показали, что поводки отсутствуют, а металлографическим анализом установлено, что окисление поверхности незначительно (до 0,5 мм). Количественно обезуглероживание в зоне впадины зуба после термообработки оценивали по результатам замеров микротвердости. На расстоянии 0,1 мм от поверхности она составила 350 HV, на расстоянии 0,3 мм — 340 HV, на расстоянии 0,5 мм — 320 HV, в сердцевине зуба — 560 HV.

Процесс аустенизации в экспериментах проводили при температурах 920—950°C с учетом того, что при более низких температурах образуется обедненный аустенит, требующий длительной выдержки для его предельного насыщения углеродом, а при более высоких температурах происходит окисление по границам зерен и рост графитных включений. После завершения аустенизации шестерни извлекали из шахтной печи, быстро переносили и погружали в расположенную рядом (3—5 м) селитровую ванну, имеющую состав 50 %  $\text{NaNO}_3$  и 50 %  $\text{KNO}_3$ .

Температуру изотермической выдержки при закалке определяли по результатам предварительных испытаний контрольных образцов чугуна аналогичного химического состава. Для деталей были выбраны режимы изотермической закалки, представленные в табл. 1.

Результаты экспериментов по изотермической закалке приведены в табл. 2.

Микроструктура после изотермической закалки по режиму 1 представляла собой преимущественно нижний бейнит без признаков распада на ферритно-карбидную смесь, количество остаточного аустенита — 20—25%. Микротвердость металлической основы — 540 HV. По краю детали присутствует небольшое количество мартенсита, что являлось причиной хрупкого разрушения образцов.

Во время закалки при температуре 320°C (режимы 1 и 4) формируется структура из нижнего бейнита, небольшого количества (10—15%) остаточного аустенита, двойникового мартенсита и карбидной фазы. Такой чугун обладает высокой прочностью (до 1240 МПа) при достаточно высоких значениях пластичности.

Изотермическая закалка от 350°C (режимы 2, 3) приводит к образованию верхнего бейнита и остаточного аустенита в количестве 25%. При этом прочность не превышает 700—800 МПа при пластичности 0,7—1,3%. При закалке 320°C (режимы 1—4) формируется структура из нижнего бейнита, небольшого количества (10—12%) остаточного аустенита, двойникового мартенсита и карбидной фазы.

Наилучшее сочетание прочности и пластичности (990 МПа и 2 %) получено по режиму 4. Поэтому на основании полученных результатов для изотермической закалки зубчатых колес главной пары автомобиля МАЗ-5551 рекомендована следующая технология.

1. Нагрев в шахтной электропечи до 950°C, выдержка 1 ч. (Желательно использование защитной атмосферы или применения обмазок во впадинах зуба.)

2. Деталь извлекается и быстро переносится в селитровую ванну при температуре 320°C и выдерживается при этой температуре 2 ч.

3. Охлаждение на воздухе и промывка (деталь извлекается из ванны, расплав стекает, деталь

Таблица 1. Режимы изотермической закалки шестерен МАЗ из высокопрочного чугуна

Номер режима	Температура аустенизации, °C	Время аустенизации, ч	Температура закалки, °C	Время изотермической выдержки, ч
1	920	1	320	1
2	920	0,5	350	1
3	950	0,5	350	2
4	950	0,5	320	2

Таблица 2. Результаты экспериментов по изотермической закалке

Номер режима	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость HRC
Без изотермической закалки (толькоотжиг)	600	2	22
1	1240	0	43
2	715	1,3	37
3	755	0,7	38
4	990	2,0	43

охлаждается на воздухе и переносится к промывочному баку Н-471 с водой при температуре 80—90°C, где промывается 20 мин).

4. Дробеочистка на дробеметной машине 345М дробью размером 0,3—0,5 мм в течение 15 мин.

Результаты испытаний опытной партии шестерен из высокопрочного бейнитного чугуна на статическую прочность на стенде экспериментального цеха МАЗа показали сопоставимые результаты (2800 кгм) с серийными шестернями из стали 12ХНЗА, упрочненными методом цементации. В настоящее время шестерни из бейнитного чугуна проходят испытания на долговечность.

Преимущества, достигаемые заменой цементуемой стали бейнитным чугуном, заключаются в увеличении стойкости инструмента до 2 раз за счет лучшей обрабатываемости чугуна, снижении в 1,5—2,0 раза энергозатрат при изотермической закалке по сравнению с цементацией, уменьшении массы зубчатых пар на 8 % за счет меньшего удельного веса материала, снижении уровня шума на 2—4 дБ, высоких демпфирующих и антизадириных свойств, обеспечивающихся наличием графитных включений.

#### Выводы

1. Механизм формирования бейнитной структуры в чугуне в целом аналогичен стали. Отличие чугуна состоит главным образом в замедлении бейнитного превращения, увеличении максимального количества остаточного аустенита и смещении этого максимума в сторону больших времен, что объясняется большим содержанием кремния и марганца.

2. Факторами, влияющими на структуру бейнитного чугуна, являются химический состав, температура и продолжительность аустенизации,

скорость охлаждения до температур промежуточного превращения, температура и продолжительность изотермической выдержки.

3. Особенности реализации технологии изотермической закалки чугунов в производственных условиях: 1) температура аустенизации чугуна в интервале 850—950°C, допускается нагрев в окислительной атмосфере; 2) быстрый перенос с температуры аустенитного превращения до температуры изотермического превращения, исключающей образование перлита. Для этого необходимы соляные ванны с температурой 200—400°C в зависимости от требуемой структуры.

4. Максимальное время полного превращения аустенита практически для любого чугуна не превышает 4 ч, коробление при этом незначительно.

#### Литература

1. Кривошеев А. Е., Таран Ю. Н., Бунина Ю. К. Промежуточное превращение аустенита в белом хромоникелевом чугуне // *Металловедение и термическая обработка*. 1966. № 4.
2. Johanson M. Austenitisch-beinitisches Guseisen mit Kugelgraphit // *Giesserei-Praxis*. 1979. N 6. P. 92—98.
3. Stenfors S. E. The effect of alloying elements on the beinite transformation in ductile iron. *Materials of Research Society Symposium*. 1985. P. 423—432.
4. Dodd J. Zwischenstufenvergütung von Guseisen mit Kugelgraphit // *Giesserei*. 1978. Vol. 65. N 4. P. 73—80.
5. Nieswaag H. Nodulaer gietijzer cun welzijdig constructie materiaal Constructeur. 1986. Vol. 25. N 7. P. Bd. 14—22.
6. Mann R., Liebera R. Einsatz von Gusseisen mit Kugelgraphit für Zahnrad. *Giessereitechnik*. 1981. Vol. 27, N 7. Bd. 206—210.
7. Bevan J. E., Schol W. G. Effects of Molybdenum on Transformation Characteristics and Properties of High-Strength Ductile Irons // *Modern Castings*. 1977. Vol. 67, N 11. P. 102—103.
8. *Giesserei-Rundschau*. 1985. N 6. P. 314—319.
9. Mann R., Wolf K., Mirr E. Zwischenstufen vergüten von Zahnrad aus unlegiertem Guseisen mit Kugelgraphit // *Giessereitechnik*. 1983. N 5. P. 135—140.

В период с 27 по 30 мая 2002 г. в г. Москве  
на территории Выставочного Комплекса  
ЗАО «Экспоцентр» на Красной Пресне

проводится Международная выставка  
«МЕТАЛТЕХЭКСПО 2002»

и Международная выставка  
«МЕТАЛЛУРГИЯ. ЛИТМАШ 2002».

Организаторы:

Messe Dusseldorf GmbH и МЕТАЛЛ-ЭКСПО  
при содействии ЗАО «Экспоцентр».

За дополнительной информацией обращаться:

(095) 925-1910, 921-5054, 923-0804

Кузнецов Евгений Иосифович.