

**Янченко А.Б.,
Савуляк В.И.**

Винницкий национальный технический
университет,
г. Винница, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧУГУНОВ С МЕЛКОЗЕРНИСТЫМ КОМПАКТНЫМ ГРАФИТОМ БЕЙНИТНОЙ ЗАКАЛКОЙ

Одной из основных задач современного материаловедения является разработка и создание новых сплавов и новых функциональных материалов с высокими триботехническими свойствами, по энергосберегающим технологиям.

Решение этой проблемы может осуществляться разными путями: за счет изменения технологии и состава легирования чугунов и сталей, путем изменения и совершенствование режимов термообработки, а также использования разных методов внешнего воздействия.

Бейнитная закалка чугунов обеспечивает существенный прирост их прочности. В ряде случаев повышается и вязкость сплавов из-за присутствия в бейните до 45 % остаточного аустенита. Высокая способность аустенита наклепываться обеспечивает и высокую износостойкость их в условиях ударных нагрузок и деформаций.

Известно, что серый перлитный чугун с пластинчатым графитом является ценным трибоматериалом, однако пластинчатый перлит (или сорбит подкалки) оказывается часто недостаточно вязким для обеспечения ударопрочности деталей. Закалка серых чугунов (СЧ) на бейнит с высоким содержанием аустенита позволяет повышать этот показатель, одновременно увеличивая и износостойкость. При этом остаточный аустенит достаточно «морозоустойчив» – низкие температуры почти не уменьшают его содержание.

Несмотря на эти преимущества, изотермическая закалка чугунов во всем мире охватывает небольшую часть отливок. Главная причина такого отставания практики от теории заключается в недостаточной технологичности изотермической закалки. Поэтому проведены исследования по устранению недостатков и поставлены задачи:

- исключить применение солевых расплавов в качестве закалочных сред, вызывающих коррозию оборудования и экологические потери;
- исключить длительные выдержки закаливаемых деталей в закалочных средах.

Нами проведены исследования по замене солевых ванн на цинковые. Исходя из того что цинк имеет температуру плавления 419 °С, сплав ЦАМ 9 - 1,5 - ниже 400 °С и при быстром переносе деталей из цинковой ванны в атмосферную печь для изотермического распада аустенита цинкования поверхности чугуна или стали практически не происходит. Постоянство температуры ванны обеспечивалось заменой части расплава металла присадками того же металла (Zn или ЦАМ) в твердом состоянии. Таким образом, использовался метод закалки в двухфазной жидко-твердой изотермической среде.

Важно отметить, что после такой бейнитной закалки СЧ сохраняет достаточно хорошую обрабатываемость резанием из-за присутствия в нем пластинчатого графита.

Чугун очень перспективен как материал для бейнитной закалки ввиду того, что даже нелегированный серый или высокопрочный чугун фактически «легирован» большим количеством кремния (до 3 %) – элемента, сдвигающего вправо С-образные кривые ТТТ-диаграмм и тормозящего карбидообразование при бейнитном распаде. Фактически бейнит в чугуне состоит из пересыщенного углеродом α' - раствора и обогащенного углеродом и стабилизированного им аустенита. В этом плане дополнительное легирование этого Fe-C-Si – сплава медью очень перспективно. Медь также ингибирует карбидообразование и повышает прокаливаемость переохлажденного аустенита. Она повышает теплопроводность чугуна, значительно улучшает обрабатываемость резанием, существенно повышает износостойкость, в том числе за счет эффекта безыносности (избирательного переноса) [1, 2, 3, 4].

Если искусственно отбеливать СЧ (за счет легирования S, Bi, Te, литья в кокиль), то после краткого графитизирующего отжига получается неоднородный (полосчатый) бейнит с повышенными триботехническими свойствами (рис. 1). Полосчатость вызвана тем, что в исходном ледебурите белого чугуна весь кремний был сконцентрирован в аустенитной фазе, а марганец – преимущественно в цементитной [4]. Такой неоднородный сплав с компактными включениями углерода отжига можно рассматривать как своеобразный композит.

Большой технологической стабильностью отличаются сплавы, содержащие более 2,0 % Si, по отношению к промежуточному или мартенситному превращению переохлажденного аустенита. На этом основано производство крупных пружин и рессор из сталей 55С2 и 60С2. Высокопрочные чугуны, большинство серых и чугуны с мелкодисперсным компактным графитом (ЧМКГ) также отвечают этому условию.

Большое будущее за закалкой на бейнитную структуру [4]. Особо перспективны закалка с «замачиванием» в жидком цинке или более легкоплавких сплавах типа ЦА (Zn – Al), либо ЦАМ (Zn – Al – Cu) либо быстрый перенос деталей из холодной воды в кипящую, а затем в печь изотермического распада аустенита [5].

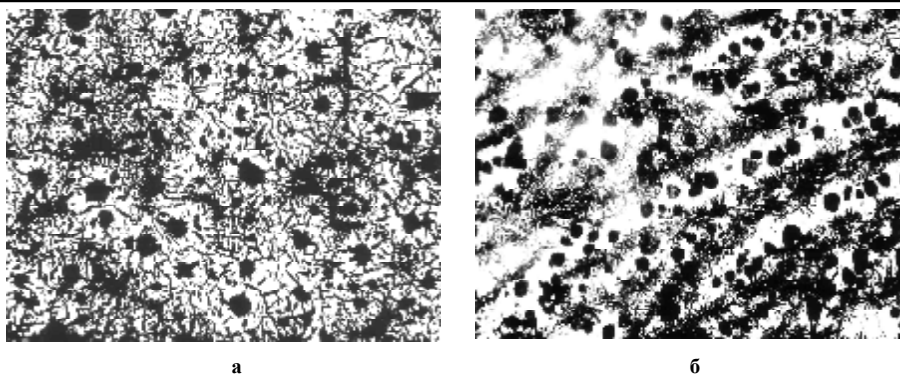


Рис. 1 – Микроструктура чугунов с компактным графитом, закаленных на бейнит (травлено ниталем $\times 100$):
 а – с однородной структурой (чугун не был предварительно отбелен и отожжен);
 б – с полосчатой структурой (чугун был предварительно отбелен и затем отожжен)

В то время как большое внимание во всем мире уделяется бейнитной закалке чугунов с компактным графитом [6], она недостаточно используется для повышения прочности серых чугунов. Вместе с тем, и в данном случае это - технологически стабильный процесс: отпадает опасность избыточного ферритообразования. Закалка с повышенных температур аустенизации (~ 950 °С) полностью исключает формирование феррита, а закалка с промежуточного интервала позволяет весьма точно регулировать содержание феррита в микроструктуре.

Для серых чугунов, содержащих более 2,0 % Si, отработан следующий технологичный и экономичный режим бейнитной закалки:

- нагрев до 850 - 900 °С, затем выдержка 1 - 0,5 ч. соответственно;
- «замачивание» в холодной воде или растворе NaCl в течение 4 с.;
- перенос в кипящую воду с выдержкой в ней 8 - 15 с. (в зависимости от сечения деталей);
- перенос в воздушную печь с заданной температурой изотермического распада аустенита и дальнейшее охлаждение на воздухе.

Твердость полученных бейнитных чугунов приведена в табл. 1. Предел прочности при этом повышается не менее чем на две ступени ГОСТ 1412-85. При твердости $< \text{HB}250$ обрабатываемость резанием не очень сильно снижается после бейнитной закалки (вследствие наличия пластинчатого графита в структуре металла). Технологическая стабильность процесса обеспечивается возможностью точно регулировать температуру и длительность изотермического превращения аустенита. При этом можно использовать и новые политермические режимы, например, превращение части аустенита в верхний бейнит, а части - в нижний.

Таблица 1

Твердость серого чугуна СЧ15 после бейнитной закалки*

Температура изотермической выдержки, °С	Длительность выдержки, ч	Твердость, НВ
375	1,0	311
400	0,75	302
450	0,5	255

*Примечание. Температура и длительность аустенизации 850 °С 1 час; замачивание в холодной воде 4с и в кипящей воде 15с, затем изотермическая выдержка в печи с воздушной атмосферой. Диаметр цилиндрических образцов 30 мм. Предел прочности чугуна после всех трех режимов выше 250 МПа.

Машина МИ-1М, граничное трение, капельная смазка веретенным маслом 3, давление в контакте $p = 0,9$ МПа, скорость скольжения 2 м/с.

Технологическая стабильность процессов при использовании «замачивания в двух водах» обусловлена также тем, что, даже при образовании за это время небольшого количества игл мартенсита (в тонкостенных частях деталей до 20 %), это почти не сказывается на окончательных результатах термообработки вследствие трооститного отпуска этих игл в печи бейнитного превращения. Действительно, свойства троостита отпуска мало чем отличаются от свойств соответствующего бейнита.

При производстве отливок из серого или высокопрочного чугуна графитизирующий отжиг часто интегрально предусмотрен в цепочке технологических процессов как постоянная мера борьбы с возможным отбелом отливок. При внедрении улучшения (на зернистый перлит), подкалки на сорбит, закалки на бейнит или мартенсит этот отжиг интегрируется с режимом аустенизации, так как температурные режимы совпадают (~ 950 °С). Это важный экономический стимул внедрения новых процессов.

По первому варианту нами использовался жидкий цинковый сплав ($T_{пл} = 419\text{ }^\circ\text{C}$) содержащий ~ 20 % кристаллического цинка. В лабораторных условиях изотермичность системы поддерживалась заливкой части расплава в изложницы, охлаждением получаемых слитков и возвратом их в расплав. Выдержка цилиндрических образцов чугунов диаметром 30 мм в жидко-твердом расплаве варьировалась от 20 до 40 с, после чего металл переносился в печь с постоянной температурой бейнитного превращения, где выдерживался от 0,5 до 1,5 часа. Исследования показали, что для нелегированного чугуна типа СЧ20 достаточно выдержки в жидкометаллической ванне 25 с и в воздушной среде при $375\text{ }^\circ\text{C}$ – один час.

Для деталей со сравнительно равной толщиной стенок разработана еще более дешевая и доступная технология, заключающаяся в аустенитизации при $850 \dots 900\text{ }^\circ\text{C}$, кратковременном погружении в холодную воду, быстром переносе в кипящую воду с кратковременной выдержкой в ней с последующим переносом в печь с воздушной атмосферой. Опыты проводили - на чугуне СЧ15 ($\varnothing 30\text{ мм}$), содержащем 3,41 % С; 2,38 % Si; 0,55 % Mn; 0,13 % S и 0,13 % P. Аустенитизация при $850\text{ }^\circ\text{C}$ длилась 1 час, погружение в холодную воду - 4 с, в горячую воду 15с. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Дальнейшие исследования направлены на отработку технологии бейнитной закалки с использованием воды в качестве закалочной среды. Рассмотрены ступенчатые режимы, при которых детали после аустенитизации замачиваются в холодном растворе соли вплоть до стабильного исчезновения свечения металла, затем переносятся в кипящую воду, после чего переносятся в атмосферную печь с температурой, необходимой для проведения изотермического распада аустенита.

Таблица 2

Износостойкость чугуна СЧ15 после бейнитной закалки

Температура изотермической выдержки, $^\circ\text{C}$	Длительность выдержки, час	Твердость, НВ	Относительная износостойкость*
375	1,0	311	2,34
400	0,75	302	1,90
450	0,5	255	1,51

1. Выдержка деталей в жидком цинковом сплаве

Этот металл имеет температуру плавления $419\text{ }^\circ\text{C}$, т.е. весьма подходящую для быстрого изъятия тепла из деталей после их аустенитизации. При $400\text{-}420\text{ }^\circ\text{C}$ вредность ванн с жидким цинком или сплавами типа ЦА и ЦАМ невелика (из опыта цехов оцинковывания метизов), особенно при защите флюсами поверхности этого металла от окисления. Выдержка деталей мелкого и среднего развеса в ванне в течение всего процесса около 1 минуты не вызывает обогащения поверхности чугуна цинком. После такого «замачивания» детали охлаждаются на воздухе до необходимой температуры и закладываются в обычную печь с воздушной атмосферой с этой же температурой (нами исследованы два ее уровня – $320\text{ }^\circ\text{C}$ и $380\text{ }^\circ\text{C}$). Чугун с компактным графитом был «нелегированным» и содержал 2,8 % Si. Результаты исследования приведены в табл. 3.

Таблица 3

Механические свойства чугуна с компактным графитом после замачивания в жидком цинке и аустенитизации

Режим термообработки (температуры аустенитизации и аустемпирования, $^\circ\text{C}$)	Длительность изотермической выдержки	Механические свойства			
		σ_B , МПа	δ , %	КСУ, Дж/см ²	НВ
900 → 320	3,0	1200÷1350	5÷6	40÷60	300÷320
900 → 380*	2,5	1100÷1200	6÷9	60÷90	280÷300
900 → 450 → 320**	1,2	1150÷1350	4÷7	40÷60	300÷320
900 → 450 → 380	1,0	1100÷1150	6÷8	70÷90	290÷300

Примечание. *После изотермической выдержки - охлаждение на воздухе.

** Приблизительная температура металла после "замачивания" в изотермической смеси жидкого и твердого цинка с температурой $419\text{ }^\circ\text{C}$. Длительность «замачивания» 1 минута.

Как видим, «замачивание» и последующее охлаждение на воздухе при переносе металла в печь аустенитизации существенно ускоряет изотермическое превращение за счет сокращения инкубационного «предраспада». Механические свойства чугуна высокие. Ванна уже не сдерживает производительность процесса, которая теперь зависит только от пропускной способности проходной печи (печей), являющейся фактически простым термостатом (ибо тепло привносится деталями) непрерывного действия.

2. Выдержка деталей в воде

Сначала опыты проводились с использованием кратковременного погружения в горячую воду [4]. Затем был разработан для деталей диаметром 30 мм (или с толщиной стенки 15 мм) следующий режим: погружение в холодную воду или раствор NaCl - 4с, - затем в кипящую воду – 15 с, затем перенос в печь аустенитизации с температурой 375 °С, либо 400 °С, либо 450 °С. Результаты предоставлены в табл. 4.

Структура чугуна получилась бейнитной. Иглы мартенсита (если они и могли появиться в небольшом количестве – до 10 - 15 % – в поверхностном слое) практически не видны - они все равно превращаются в троостит отпуска, имеющего почти те же свойства, что и соответствующий бейнит [5].

Процесс отличается дешевизной и легко реализуется при минимальных капитальных вложениях. Закалочных трещин в металле нет, коробление деталей незначительное, хотя и несколько больше, чем при погружении в жидкий цинк (или в сплавы цинк – алюминий типа ЦА и типа ЦАМ с температурой плавления ниже 400 °С). Однако в случае очень разностенных деталей этот процесс неосуществим из-за массового образования мартенсита в тонкостенных частях и троосто-сорбита в толстостенных.

В этом случае «замачивание» в цинке или сплавах типа ЦА или ЦАМ незаменимо.

Таблица 4

Твердость серого чугуна типа СЧ15 после аустемпирования

Температура аустемпирования, °С	Длительность аустемпирования, час	Твердость, НВ
375	1,0	311
400	0,75	302
450	0,5	255

Температура и длительность аустенитизации – 850 °С, 1час; замачивание в холодной воде в течение 4 с и затем в кипящей воде в течение 15 с, после чего металл претерпевал изотермическое превращение в печи сопротивления с воздушной атмосферой.

Прочностные свойства σ_B повышены на 10 МПа и более.

Выводы

1. Операцию изотермической выдержки необходимо выносить из закалочных ванн и переносить в обычные печи с воздушной атмосферой (например, в проходные печи), сохранив ванны лишь для кратковременного "замачивания" аустенитизированного металла.
2. Селитровые и другие солевые закалочные среды желателно при этом заменить на жидкометаллические, воду или раствор NaCl. Технологичной и безопасной жидкометаллической средой могут служить цинк или его сплавы с алюминием.
3. Серый чугун с пластинчатым графитом также целесообразно во многих случаях подвергать аустемпированию, в частности для повышения его марки.

Литература

1. Жуков А.А. Технологически стабильные процессы получения бейнитного чугуна / А.А. Жуков, А.Б. Янченко // Литейное производство. – 1993. – №12. – С.8-9.
2. Жуков А.А. Технологически стабильные процессы получения бейнитного чугуна с пластинчатым и компактным графитом / А.А. Жуков, А.Б. Янченко // Процессы литья. – 1993. – № 1. – С. 108.
3. Савуляк В.І. Побудова та аналіз моделей металевих сплавів // В.І. Савуляк, А.О. Жуков, Г.О. Чорна. – Вінниця: УНІВЕРСУМ. – 1999. – 200 с.
4. Zhukov A.A. Some peculiarities and new trends in ADI technology / A.A. Zhukov, A.B.Yanchenko // Indian Foundry Journal. – 1992. – No8. – P. 17-22.
5. Жуков А.А. Ступенчатые режимы закалки чугунов на бейнитную структуру / А.А. Жуков, А.Б. Янченко, П.М. Котляров // В кн.: Антифрикционные и износостойкие чугуны. – Винница. Изд. Ассоциация литейщиков Украины. – 1992. – С. 69-71.
6. Nili Ahmadabadi M. Effects of successive – stage austempering on the structure and impact strength of high - Mn ductile iron/ Nili Ahmadabadi M., Ohide T., Niyama E. // Cast Metals. – 1992. – vol.5. – No2. P. 62-72.
7. Биколов Р.А. Влияние сфероидизирующего модифицирования на механические свойства термически обработанных аустенито-бейнитных чугунов / Биколов Р.А., Асташенко В.И., Колесников М.С., Асташенко Т.В. // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород. – 2010. – № 2 (81). – С. 238-242.

Надійшла 02.02.2012