

УДК 536.246.2

ТЕХНИЧЕСКИЙ УГЛЕРОД ИЗ ИЗНОШЕННЫХ АВТОШИН: ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ

*Г.И. Журавский**Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси*

Актуальность проблемы

Известно около 30 компаний, которые принимали попытки создать оборудование для пиролизной переработки резинотехнических отходов. Однако до настоящего времени не удалось разработать технологический процесс и оборудование, основанные на процессе пиролизного разложения отходов, которое обеспечивало бы высокое качество получаемых продуктов, энергетическую эффективность, безопасность и хорошие экологические показатели.

Были построены различные виды реакторов:

– вертикальные шахтные (Фирма «Тайролиз» в 1984 г. ввела в действие первую в Великобритании полномасштабную установку пиролиза изношенных шин. Она располагалась в местечке Фор – Эшед, в центральной части Великобритании. Производительность установки 50 тыс. тонн шин в год. Стоимость около 40 млн долларов США. По экономическим (низкая стоимость продуктов переработки), техническим (межремонтный пробег установки для резки шин всего 3 недели), экологическим причинам (выбросы в окружающую среду продуктов сжигания на факел газов пиролиза) в настоящее время данное оборудование не используется);

– вращающиеся барабанные (Японская компания «Cobe Steel» создала установку для пиролиза измельченных шин во вращающейся барабанной печи. Необходимое для пиролиза тепло подводилось к отходам через стенки барабана. В результате отложений кокса на стенках происходило прогорание барабана и выход печи из строя.)

– термоконтактные (Немецкая компания в г. Эбенхаузен построила реактор с кипящим слоем, в котором подвергались пиролизу изношенные шины. В данном случае тепло к отходам подводилось непосредственно в реакторе от разогретого

слоя кварцевого песка, что позволило существенно (в несколько раз) интенсифицировать подвод тепла непосредственно к отходам. Однако, из-за технических проблем оборудование в настоящее время не эксплуатируется.

Одной из проблем пиролизной переработки резинотехнических отходов является низкое качество получаемых продуктов, в частности, технического углерода, который требует специальной доработки для получения коммерческого продукта. Именно по этой причине, а также ряду обстоятельств, связанных с неэффективными теплотехническими решениями при создании реакторов потерпели неудачу попытки известных компаний создать экономичное оборудование для пиролиза изношенных шин (Kobe Steel в Японии, Tosco в США, Tyrolysis в Англии, Ebenhausen в Германии).

Впервые твердые углеродсодержащие продукты пиролиза резинотехнических отходов (изношенных автошин) начали использовать на некоторых заводах Японии для производства резиновых смесей. Изготавливались диэлектрические резиновые боты, велосипедные шины и ободная лента.

Испытания показали, что резиновая смесь на основе углеродсодержащих продуктов пиролиза изношенных шин имеет меньшую прочность на разрыв (17,6 МПа), меньшую величину сопротивления раздиру (380 Н/см) по сравнению с резиновой смесью на основе товарного технического углерода марки HAF-LS (прочность на разрыв – 18,2 МПа; сопротивление раздиру – 440 Н/см). Несмотря на это, сделан вывод о том, что получаемый углерод может применяться для изготовления некоторых резиновых изделий.

Твердые продукты пиролиза резинотехнических отходов содержат значительное количество

неорганических составляющих (зола). Как показывают исследования, зола твердых продуктов является частично растворимой. Поэтому одним из вариантов снижения зольности твердых продуктов является их обработка водой. Но значительное количество золы представляет собой неорганические нерастворимые соединения.

Основными представителями неорганической составляющей в твердых продуктах являются ZnO , ZnS , SiO_2 , Al_2O_3 , $CaCO_3$, окислы железа. Состав неорганических составляющих зависит от температуры термического разложения. Например, концентрация ZnO с ростом температуры уменьшается, а концентрация ZnS увеличивается. Очевидно, что ZnS может образоваться в результате реакции $ZnO + S \rightarrow ZnS + 1/2 O_2$. Часть серы удаляется при деструкции органических сернистых соединений.

Образование ZnS является очень важным потому, что данное соединение формируется в виде индивидуальных частиц с намного более высокой плотностью, чем частицы углерода и это обстоятельство может быть использовано при разделении соединений цинка и углерода путем флотации.

Одним из вариантов использования жидких продуктов пиролиза резиновых отходов для производства резин является получение на их основе пластификаторов путем выделения фракции с температурой кипения выше $350^\circ C$ [1].

Предпринимались также попытки использовать в качестве наполнителей для каучуков суспензию твердых продуктов пиролиза резиновых отходов в жидких.

Однако, качественные показатели (зольность, выход летучих, содержание серы и цинка, дисперсность, удельная поверхность и др.) твердых и жидких продуктов пиролиза резиновых отходов изменяются в значительных пределах (в зависимости от состава исходного сырья). В связи с этим не представляется возможным на основе таких продуктов без технической сложной и дорогостоящей переработки получить высокосортные сырье со стабильными качественными показателями.

Поэтому в настоящее время в мире интенсивно проводятся работы, направленные на создание комплексных технологических процессов и оборудования, которые обеспечили бы возможность возврата продуктов пиролиза резиновых отходов (твердых и жидких) в резинотехническую промышленность в качестве заменителей высокосортного технического углерода, пластификато-

ров и других дорогостоящих ингредиентов резиновых смесей.

Технология производства углерода

При изготовлении резиновых смесей используется технический углерод, который является одним из основных ингредиентов. Термолиз резины при температурах до $500\text{--}600^\circ C$ практически не оказывает влияния на качественные показатели технического углерода, содержащегося в твердых продуктах разложения. Дальнейшее повышение температуры в присутствии водяных паров в реакторе приводит к интенсификации процессов взаимодействия углерода с водяным паром, в результате которого часть углерода расходуется на образование оксида углерода и при этом снижаются качественные показатели технического углерода.

Известно, что твердые продукты пиролиза содержат значительное ($10\text{--}15\%$) золы и некоторое количество ($5\text{--}15\%$) летучих продуктов (углеводородов, которые остаются в твердых продуктах после пиролиза отходов).

Твердые продукты с такими показателями не пригодны к использованию в качестве технического углерода. Поэтому данные продукты необходимо дополнительно обрабатывать, что представляет значительные технические сложности. В первую очередь, потому, что частицы золы в твердых продуктах связаны (соединены) с частицами углерода и требуется дополнительная технологическая операция (длительное механическое измельчение с большими энергетическими затратами) для разделения частиц золы и углерода, что бы на последующих стадиях отделить высокосортный технический углерод, который использовался при изготовлении резины, от частиц золы.

Представляется перспективным использовать термический метод разделения частиц золы и углерода и удаления летучих продуктов, сущность которого состоит в следующем.

Осуществляется термическое разложение смеси жидких продуктов (жидкой фракции термолиза отходов) с углеродным остатком, что позволяет одновременно с получением технического углерода (образуется в результате термического разложения жидких продуктов) осуществить прогрев и прокалывание углеродного остатка. В результате прогрева и прокалывания углеродного остатка из него удаляются остаточные летучие продукты, выгорают сернистые соединения, разрушаются сродки частиц золы и углерода, происходит измельчение частиц углеродного остатка.

Данные эффекты приводят к тому, что углеродный остаток обогащается углеродом и снижается содержание водорода, т.е. устанавливается требуемое по показателям качества атомное отношение водорода к углероду (H:C). В противном случае (при более высоких значениях атомного отношения водорода к углероду) углеродный остаток будет представлять собой не технический углерод, а кокс [2].

Для оценки возможности применения жидких продуктов термоллиза резиновых отходов, в качестве сырья для получения высокосортной сажи (технического углерода) выполнен анализ жидкой фракции термического разложения изношенных шин и на основании данного анализа произведена оценка качества данной фракции. Установлено, что в состав исходной жидкой фракции термоллиза резиновых отходов входят масла (74,31 %), смолы (8,8 %), асфальтены 1,8 %, парафин 2,31 %, а коксумость исходной составляет 0,7 % при допустимых 1,5. На основании этого можно сделать вывод, что по компонентному составу (низкое содержание смол и парафина), коксумости, содержанию серы (0,75 % при допустимых 2,5 %) и содержанию воды (0,12 % при допустимых 1–1,5 %) исходная жидкая фракция может рассматриваться как потенциальное сырье для получения технического углерода.

Для получения из жидкой фракции качественного сырья, которое может быть использовано при производстве технического углерода необходимо произвести разделение исходной фракции на составляющие.

Рассмотрен вариант разделения исходной жидкой фракции на две составляющие: легкую

фракцию с температурой кипения до 200 °С и тяжелую фракцию с температурой кипения в интервале 200–400 °С (фото 1).

Количество легкой фракции, которая представляет собой аналог бензина, достигает величины 18 масс.%. Данная фракция, в первую очередь, может использоваться для получения моторных топлив. Расчеты показывают, что содержание водорода в тяжелой фракции снижается в сравнении с исходной жидкостью и составляет 9,37 %, а содержание углерода повышается до величины 88,98 % [3].

Таблица 1

Физико-химические характеристики жидких фракций

Характеристики	Фракция	
	бензиновая	Широкая
Внешний вид	Желтая жидкость	Темно-коричневая жидкость
Выход из сырья, масс. %	18,76	80,07
Плотность, кг/м ³	829,7	936,9
Содержание серы, масс. %	0,57	0,90
Октановое число	122	–
Йодное число	33,8	26,1
Начало кипения, °С	65	205
Конец кипения, °С	197	360
Температура вспышки в закрытом тигле, °С	37	104
Теплота сгорания, кДж/кг	41 000,0	39 000,0



Фото. 1. Фракция с температурой кипения 205–360 °С (слева) и фракция с температурой кипения 65–197 °С (аналог бензина)

Таким образом, тяжелая фракция (диапазон кипения 200–400 °С) жидких продуктов термолитического разложения изношенных шин по основным показателям (табл. 2) удовлетворяет требованиям, предъявляемым к качественному жидкому сырью для производства технического углерода печным способом.

Таблица 2

Показатели жидких продуктов термолитического разложения автошин

Показатель	Стандарт	Фактическое значение
Отношение Н:С	1–1,2	1,26
Характеризующий фактор	8–9	7,4
Индекс корреляции	95–105	63
Коэффициент ароматичности	140 – 170	144
Коксуемость	не выше 1,5	0,70
Содержание серы	до 2,5 %	0,75
Содержание воды	до 1,5%	0,12
Содержание смол	до 9,0	8,8
Содержание асфальтенов	до 10,0	1,8
Содержание парафинов	до 7,0	2,31

Известно, что технический углерод образуется только из газовой или паровой фазы исходного сырья. Это означает, что жидкое сырье, которое подают в реактор для производства технического углерода должно испаряться с высокой скоростью, в противном случае вместо технического углерода будет образовываться кокс.

Исходя из механизма образования технического углерода, предложен процесс получения его из продуктов термолитического разложения изношенных шин (смеси жидких и твердых – композитной смеси).

Для получения продуктов разложения отходов и приготовления композитной смеси разработан технологический процесс, который аппаратно оформлен в виде мобильного комплекса, размещенного (рис. 1) на трех автомобильных полуприцепах увеличенного объема.

На одном полуприцепе размещается камера термолитического разложения с примыкающими к ней по обе стороны через герметичные затворы шлюзовыми камерами; контейнеры для обрабатываемого

материала, которые находятся внутри камеры; специальный газовый теплообменник; циркуляционный вентилятор; соединительные трубопроводы; пульта управления всей установкой.

На втором полуприцепе находится вспомогательное оборудование для обработки пара и воды. Оно включает в себя конденсатор с емкостями для слива и разделения получаемых при термолитическом разложении резины жидких продуктов, насосы для перекачки жидкостей. Кроме того, здесь находится блок для охлаждения воды и используемой для охлаждения пара в конденсаторе; блок для очистки воды; парогенератор с питательным баком; дымосос; бак для жидкого топлива.

На третьем полуприцепе располагается оборудование для обработки получаемого в процессе термолитического разложения резины твердого остатка и приготовления композитной смеси. Это оборудование состоит из транспортеров, дробилки, мельницы, магнитного сепаратора, смесителя.

Технологический процесс получения высокосортного технического углерода из продуктов термолитического разложения резинотехнических отходов включает практически все основные стадии (операции) производства технического углерода из жидкого сырья. Однако при этом необходима модернизация отдельных элементов оборудования (оборудование подготовки сырья, реакторный блок и блок выделения углерода из парогазовых продуктов).

Принципиальная технологическая схема получения высокосортного технического углерода из продуктов термолитического разложения резинотехнических отходов приведена на рис. 2.

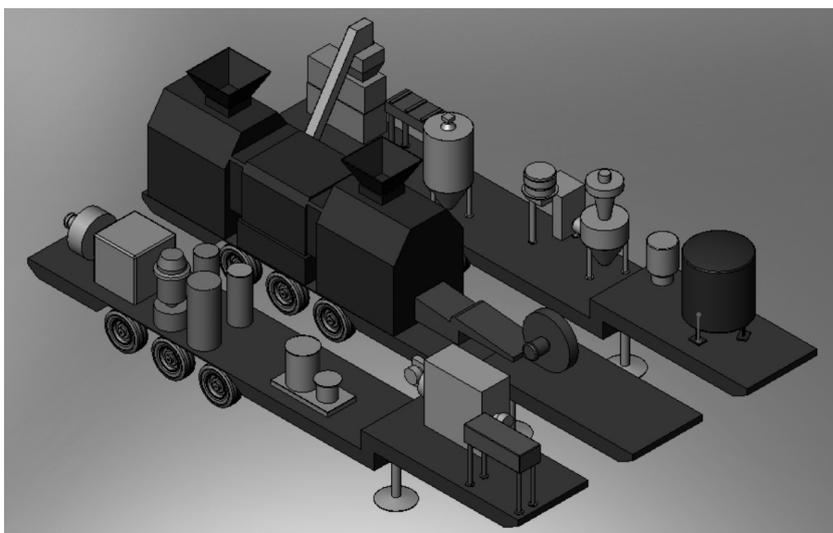


Рис. 1. Мобильный комплекс УТРО-500

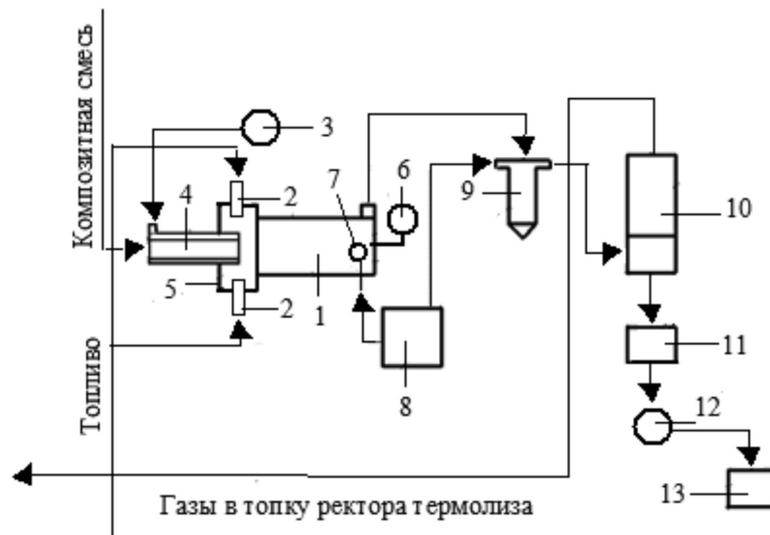


Рис. 2. Технологическая схема получения технического углерода из композитной смеси:

1 – реактор; 2 – горелки; 3 – воздуходувка; 4 – форсунка для подачи композитной смеси в реактор получения технического углерода; 5 – камера горения; 6 – датчик температуры; 7 – водяная форсунка; 8 – емкость с водой; 9 – циклон; 10 – фильтр; 11 – накопитель технического углерода; 12 – вентилятор; 13 – склад углерода

Композитную смесь из накопительной емкости подают в камеру горения 5 реактора 1 с помощью форсунки 4. Одновременно в горелки 2 подают топливо, а от вентилятора 3 в горелки 2 подают воздух, необходимый для сжигания топлива. В результате сгорания топлива образуется вихревой факел, в который из форсунки 4 поступает композитная смесь.

Часть композитной смеси сгорает, а часть термически разлагается с образованием сажи. Газовый поток протекает по реакционной камере реактора 1. Из емкости с водой 8 через форсунку 7 в реакционную камеру распыляют воду и охлаждают газовый поток до температуры 600–700 °С, что контролируют по показаниям датчика температуры 6. Охлажденный газовый поток далее направляется в циклон 9, куда из емкости 8 распыляют воду, в результате чего поток охлаждается до температуры 50–60 °С. Затем охлажденный поток подают в фильтр 10, где отделяют технический углерод от газов. Газы подают на сжигание в топку реактора термоллиза и сжигают, что позволяет снизить расход топлива, расходуемого на процесс термоллиза. Технический углерод из фильтра 10 направляют в емкость 11, из которой с помощью вентилятора 12 технический углерод подают на склад 13.

В реакторе 1 протекает неполное сгорание смеси, в результате чего за счет выделяющейся теплоты происходит термическое разложение углеводородов, содержащихся в жидкой фракции, образуется технический углерод и горючие газы.

Углерод твердого остатка частично сгорает, а частично нагревается до температуры 1100 °С и при этом из углеродного остатка удаляются остаточные углеводороды и сернистые соединения, за счет чего развивается удельная поверхность.

Исследования показывают, что при использовании композитной смеси продуктов термоллиза резинотехнических отходов в качестве сырья может быть получен высокосортный технический углерод в количестве (в расчете на 1000 кг смеси) 396 кг (106 кг из жидкой фракции и 290 кг из твердых продуктов).

Технологический процесс переработки изношенных автошин включает три стадии: паровой термоллиз шин, получение композитной смеси твердых и жидких продуктов разложения шин, производство технического углерода, как из композитной смеси, так и из жидких продуктов.

Таким образом, в результате исследований подтверждена возможность получения высокосортного технического углерода из твердых и жидких продуктов термоллиза изношенных автошин. Это является обоснованием нового направления практического использования продуктов пиролиза резинотехнических отходов. До настоящего времени жидкие и твердые продукты пиролиза резинотехнических отходов не находили широкого практического применения по причине низкого качества, а использовались в основном как заменители топлив и низкосортные наполнители для производства ответственных резинотехнических изделий.

Все это не позволяло создать коммерческое оборудование для переработки широкого спектра резинотехнических отходов с получением ценных продуктов, имеющих спрос на рынке.

Оборудование переработки изношенных автошин

Паровой термолиз изношенных автошин и получение композитной смеси твердых и жидких продуктов разработаны в ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси» [3–8].

По приглашению французской стороны сотрудники Института демонстрировали новую технологию переработки изношенных шин на территории предприятия «AIRBUS» (г. Тулуза) с целью оценки энергетической и экологической эффективности.

Положительные результаты демонстрации технологии во Франции позволили заключить и реализовать лицензионный договор между Институтом (Лицензиар) и Обществом с ограниченной ответственностью АЛЬФА РЕЦИКЛАЖ ФРАНС КОНТЕ (Лицензиат) на передачу права на использование ноу-хау (информация о технологии переработки изношенных шин методом парового термолиза и о конструкции оборудования, реализующего передаваемую технологию). Договор зарегистрирован в Национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь 17 августа 2010 г. № 4327.

В результате сотрудничества с компанией АЛЬФА РЕЦИКЛАЖ ФРАНС КОНТЕ в 2014 году создано и поставлено оборудование термолизной переработки изношенных автошин (см. обложку, фото 1).

Данная компания является членом Союза предприятий Франции по переработке шин, вторым по значению экологическим органом, уполномоченным производителями шин отвечать за сбор и переработку изношенных шин в соответствии с существующим законодательством.

АЛЬФА РЕЦИКЛАЖ ФРАНС КОНТЕ использует площадку, расположенную в производственной зоне СИКТОМ в г. Доле, для измельчения изношенных шин в количестве 15 000 т/год.

Поставленное оборудование состоит из двух паротермолизных линий с минимальной производительностью по 1 т/ч измельченных шин каждая, объединенных с одной общей линией переработки углерода, одной общей линией по сепарации и накоплению термолизного топлива и одной общей системой обработки газовых и водных выбросов. В расчете на 330 дней работы,

перерабатываемое количество шин составляет 15 840 т в год.

Комплекс включает оборудование для термолитической переработки, оборудование по доведению жидких углеводородных фракций до требуемых показателей качества (температуры вспышки в закрытом тигле не ниже 55 °С), оборудование для очистки водяного конденсата, оборудование системы обработки атмосферных выбросов, оборудование системы управления технологическими процессами, оборудование обеспечения безопасности при работе, градирню, оборудование контроля качества продуктов термолизной переработки.

Производимый на данном предприятии технический углерод был испытан в качестве заменителя высокосортного технического углерода при производстве резинотехнических изделий. Партия технического углерода в количестве 400 кг была поставлена компанией

АЛЬФА РЕЦИКЛАЖ ФРАНС КОНТЕ на ОАО «Чеховский регенераторный завод» (г. Чехов, Московская область) в 2016 году с целью отработки рецептур резиновых смесей.

В условиях производства РТИ были вулканизированы плиты дорожные размера 500 × 250 × 40 мм. Вся партия опытной резиновой смеси переработана на изготовление резиновых деталей – «Дорожных плит» и «Лежачий полицейский», прошла испытания и сдана заказчику (см. Таблица 3, фото 2 на обложке)

Таким образом, в условия промышленного производства отработаны рецептуры резиновых смесей при полной замене серийного технического углерода на технический углерод из изношенных автошин, произведены резинотехнические изделия, удовлетворяющие установленным требованиям, и, тем самым, обоснована возможность использования в резинотехнической промышленности технического углерода из изношенных автошин.

Таблица 3

Технические характеристики оборудования

Показатели	Значения
Производительность, кг/ч	2000
Температура переработки, 0С	не более 450
Давление в реакторе, Па	не более 100
Расход водяного пара, кг/ч	500 – 600
Тепловая мощность топки, кВт	580 – 600
Расход топлива, кг/ч	не более 150
Тепловая эффективность, %	не менее 70

Таблица 4
Показатели резиновых смесей
(три партии, каждая по 220 кг)

Наименование показателей	Фактически	Норма контроля
Прочность, кгс/см ²	24, 25, 27	не менее 25
Относительной удлинение, %	150, 150, 140	не менее 100
Твердость по Шору А, усл.ед.	61, 60, 59	не менее 60

Резиновые смеси со 100 % заменой технического углерода П 803 на технический углерод из изношенных автошин полностью соответствуют требованиям стандартов.

Перспективы промышленного использования технологии

На протяжении ряда последних лет коллективом сотрудников Института тепло – и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси и ООО «НПО Инноватех» (г. Санкт-Петербург) разрабатывалась технология термоллиза изношенных автошин, основанная на свойствах органических

соединений подвергаться деструкции при нагревании. В течение этого времени были найдены новые технические решения, позволяющие «нейтрализовать» агрессивную среду в реакторе путем подачи водяного пара на стадии термического разложения отходов и тем самым снизить воздействие вредных соединений и их выход в рабочую зону. В результате была обоснована концепция «парового термоллиза», т. е. использования водяного пара, как эффективного теплоносителя и инертной среды для снижения образования экологически опасных соединений и возможности получения ценных конечных продуктов, которые могут быть сертифицированы как заменители технического углерода для резинотехнической промышленности.

Руководство ООО «НПО Инноватех» на Петербургском международном экономическом форуме (ПМЭФ) выступило с инициативой строительства завода для переработки изношенных автомобильных покрышек. В результате подписано соглашение о намерениях. При этом органы власти представляли губернатор Георгий Полтавченко и заместитель министра промышленности Виктор Евтухов.

Инвестиции должны составить около 900 млн рублей РФ, будет создано 100 новых рабочих мест и решена проблема с залежами изношенных автошин, которых только на полигоне «Красный Бор» под г. Санкт-Петербург скопилось более 17 тысяч тонн.

В настоящее время «НПО Инноватех» готовит пакет документов для присвоения стратегического статуса проекту завода по переработке шин.

Непосредственное участие в реализации данного проекта будут принимать сотрудники Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, как основные разработчики технологического процесса.



Фото 2. На церемонии подписания соглашения о намерениях: губернатор Георгий Полтавченко (справа) и генеральный директор ООО «НПО Инноватех» Алексей Градов (июнь 2016 года)

Список использованных источников

1. Способ получения мягчителя резиновой смеси: патент РФ. № 2325409 / Миничалиев Т.Б., Дорожкин В.П., Сухова Д.А. Оpubл. 27.05.2008г. БИ № 6.
2. Сюняев З.И. Нефтяной углерод, М.: Химия, 1980, с.21
3. Паровой термоллиз органических отходов / Д.В. Аристархов и [и др.]; под ред. акад. О.Г. Мартыненко. – Мн.: ИТМО им. А.В. Лыкова, 2001. – 135 с.
4. Математическая модель термодеструкции изношенных автомобильных шин в среде перегретого водяного пара / В.А. Бабенко [и др.]// Инженерно-физический журнал. – 2009. – Т.82, №1. – С.114 – 126 .
5. Steam Thermolysis of Technical Rubber Material / Henadz Zhuranski [etc.] // Rabber: Types, Properties and Users. Nova Science Publishers. – 2011. – Pp. 531–548.
6. Аристархов, Д.В. Технологии и оборудование для переработки резинотехнических отходов / Д.В. Аристархов, Г.И. Журавский. – LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, Germany. – 2012. – 124 с.
7. Журавский, Г.И. Технологии и оборудование для переработки резинотехнических отходов / Г.И. Журавский, Д.В. Аристархов, А.С. Матвейчук // Экология и промышленность России. – Апрель 2012. – С.4 – 7.
8. Журавский, Г.И. Топливо из отходов / Г.И. Журавский // Наука и инновации, 2012. – № 9. – С. 10–13.

Перспективы использования аустенито-бейнитного чугуна (ADI) в Беларуси

А.И.Покровский (ФТИ НАН Беларуси)

1

Задача презентации:
показать преимущества бейнитного чугуна по сравнению с высококачественной сталью

Целевая аудитория:
технические специалисты машиностроительных заводов (конструктора, технологи, термисты, металлурги, сотрудники ЦЗЛ)

3

Преимущества чугунов по сравнению со сталью, обусловленные наличием включений графита в структуре

(на примере автомобильных деталей)

1. Масса меньше на 10% (напр., картеры, поддоны)
2. Быстрее гасит вибрации и звук (напр., толкатели клапанов)
3. Выше теплопроводность (напр., гильзы цилиндров)
4. Хорошие антифрикционные характеристики (напр., распределительные валы)

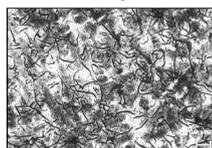
5

Содержание

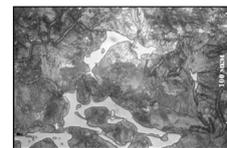
1. О ведущем месте высокопрочного чугуна среди прочих
2. ADI: Терминология. История. Теория
3. ADI: Механизм бейнитного превращения. Микроструктура
4. ADI: Принципы легирования. Химический состав. Марки
5. ADI: Технологии термической обработки. Свойства
6. ADI: Промышленное производство ADI: состояние и перспективы
7. Оборудование для ADI: особенности
8. ADI: Освоенные типоразмеры деталей
9. Механическая обрабатываемость ADI: некоторые проблемы
10. ADI в Беларуси: одна из попыток применения
11. Эпилог
12. Резюме
13. Контакты

2

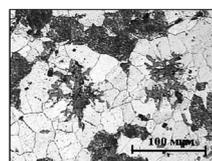
Введение. Типовые структуры чугунов различных классов



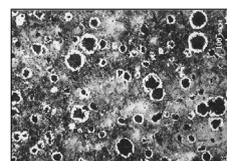
Серый



Половинчатый



4 Ковкий



Высокопрочный

Два важнейших события в истории развития чугунов,

которые кардинальным образом расширили их области применения:

1. 40-е годы прошлого века - получение включений графита сфероидальной формы (начало эпохи высокопрочного чугуна - ВЧ)
2. 70-е годы прошлого века - формирование металлической матрицы ВЧ в виде аустенито-бейнитной смеси (создание бейнитного чугуна).

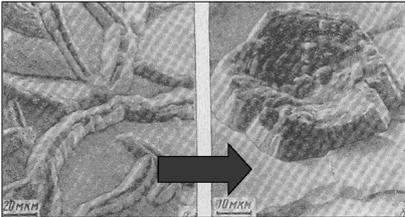
6

1. О ведущем месте высокопрочного чугуна среди прочих

7

Высокопрочный чугун

получают путем модифицирования серого чугуна.



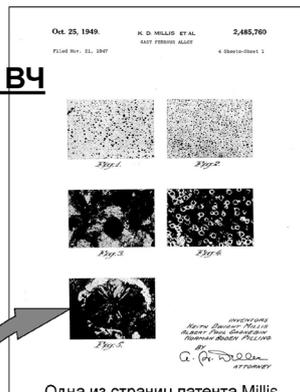
Введение в расплав небольших добавок, содержащих магний или церий приводит к «сфероидизации» – образованию графита шаровидной формы

9

Первый патент на ВЧ

25 октября 1949 г. – публикация первого патента на «Cast ferrous alloy» (высокопрочный чугун)

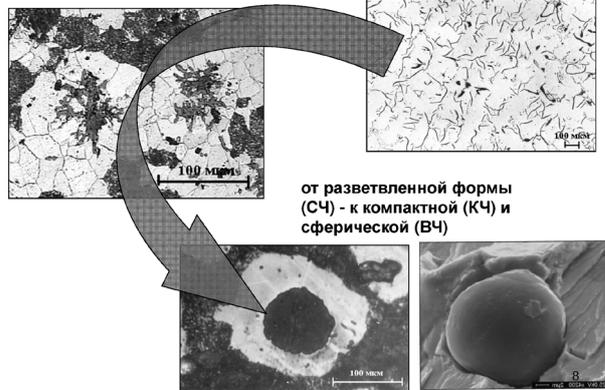
Авторы: **Keith Dwight Millis** и два его соавтора



Одна из страниц патента Millis (видна лучистая структура глобуля графита)

11

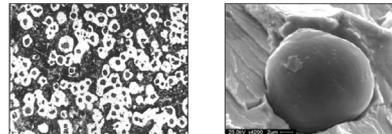
1-ый ключевой этап в развитии чугунов: совершенствование формы графита в чугуне



от разветвленной формы (СЧ) - к компактной (КЧ) и сферической (ВЧ)

Из истории высокопрочного чугуна

Впервые высказал намерение совершенствовать форму графита в сером чугуне **J.W. Bolton** в 1943 году на съезде Американской ассоциации литейщиков (AFS).
Несколько недель спустя в 1943 году американец **Keith Dwight Millis** в лаборатории "International Nickel Company" (INCO) обнаружил, что при добавлении магния в расплав чугуна (модифицирование в ковше) образуется графит практически идеальной шаровидной формы



7 мая 1948 г. на съезде американских литейщиков в Филадельфии фирмой INCO было сделано публичное заявление об успешном получении высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

10

Начиная с 1948-1949 гг. во всем мире активнейшим образом развиваются способы получения чугуна с шаровидным графитом, **опубликованы тысячи статей, созданы целые научные школы** по разработке технологий получения ВЧШГ и изучению их свойств

Действующий с 1985 г. по настоящее время в странах СНГ межгосударственный стандарт **ГОСТ 7293-85 «Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки»** предусматривает наиболее высокую марку высокопрочных чугунов ВЧ 100 с показателем предела прочности при растяжении 1000 МПа

12

Высокопрочный чугун.
Маркировка

Предусмотрено 8 марок (от ВЧ 35 до ВЧ 100).
Обозначение:
ВЧ – Высокопрочный чугун
50 – предел прочности при растяжении, в кгс/мм² (что соответствует 500 МПа).

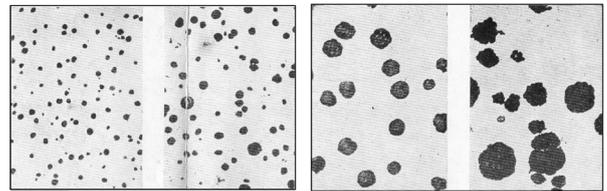
КОНТРОЛЬНЫЙ ЭКЗЕМПЛЯР
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР
ЧУГУН С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ ДЛЯ ОТЛИВОК
СТ СБ 4558–84
Издание официальное

С. 2 ГОСТ 7293–85

Марка чугуна	Марка чугуна по СТ СБВ 4558–84	Временное сопротивление при растяжении σ_r , МПа (кгс/мм ²)	Условный предел текучести $\sigma_{0.2}$, МПа (кгс/мм ²)
ВЧ 35	33135	350 (35)	220 (22)
ВЧ 40	33140	400 (40)	250 (25)
ВЧ 45	33145	450 (45)	310 (31)
ВЧ 50	33150	500 (50)	320 (32)
ВЧ 60	33160	600 (60)	370 (37)
ВЧ 70	33170	700 (70)	420 (42)
ВЧ 80	33180	800 (80)	480 (48)
ВЧ 100	—	1000 (100)	700 (70)

Самые типовые марки: ВЧ 45, ВЧ 50.

Высокопрочный чугун: примеры включений в структуре, диапазон пластичности



Относительное удлинение и твердость чугуна		
Марка чугуна	Относительное удлинение, δ , %, не менее	Твердость по Бринеллю, НВ
ВЧ 35	22	140–170
ВЧ 40	15	140–202
ВЧ 45	10	140–225
ВЧ 50	7	153–245
ВЧ 60	3	192–277
ВЧ 70	2	228–302
ВЧ 80	2	248–351
ВЧ 100	2	270–360

2. ADI

**Терминология
История
Теория**

Терминология

(в наст. время употребляются различные аббревиатуры):

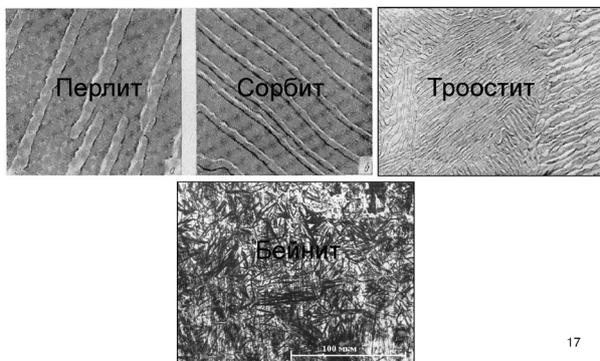
В странах СНГ: **АБЧ** (аустенито-бейнитный чугун); **АБЧШГ** – аустенито-бейнитный чугун с шаровидным графитом

Англоязычное сокращение: ADI (Austempering Ductile Iron) – высокопрочный чугун с шаровидным графитом, закаленный на бейнитную структуру

В немецкоязычной литературе - Zwischenstufenvergütung von Gusseisen mit Kugelgraphit (улучшенный в промежуточной области превращений чугун с шаровидным графитом)

Наиболее общепризнанное сокращение:
ADI

2-ой этап совершенствования чугунов: Формирование аустенито-бейнитной структуры металлической матрицы



Из истории ADI

Первые публикации по аустенито-бейнитному чугуну относятся к 50-м годам 20-го века

Большой вклад в 1970 - 1990-х годах в теорию и практику бейнитного чугуна внесли работы **Dodd J., Matti Johanson, Stenfors S.E., Klaus Rohrig** и др.

После того, как на опытных образцах были достигнуты значения предела прочности при растяжении на уровне **1500 МПа** и относительного удлинения до **10%**, началось широкое освоение высокопрочного бейнитного чугуна

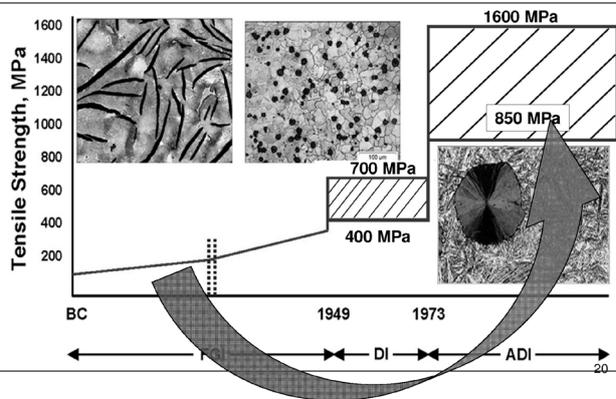
В настоящее время в промышленных масштабах выпускаются сотни типоразмеров деталей. В частности, у фирм General Motors и Ford наиболее массовыми изделиями являются зубчатые колеса

Ключевые даты в развитии ADI (высокопрочного бейнитного чугуна)

- 1930 – Bain и Grossman – создание диаграммы изотермического превращения аустенита
- 1940 – Flinn - первое применение аустемперинга к серому чугуну
- 1948 – Millis – первый патент на высокопрочный чугун.
- 1973 – Rieger – первое применение аустемперинга к высокопрочному чугуну (коленвал компрессора)
- 1986 – Первый временный стандарт фирмы BCIRA, Великобритания (3 марки ADI)
- 1987 – Разработка фирмой VDG, Германия, стандарта W52 (4 марки ADI)
- 1989 – Первый японский стандарт - JIS G 5503 на ADI
- 1990 – Первый стандарт США - A897-90 (ASTM) на ADI
- 1997 – Первый европейский стандарт - EN 1564 на ADI

19

Совершенствование структуры и динамика роста прочности чугунов



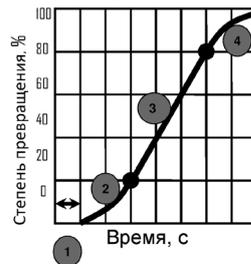
Теория

Ключевые положения теории распада аустенита при охлаждении

- ❖ Понимание механизма превращения аустенита в бейнит при охлаждении необходимо для разработки технологии

21

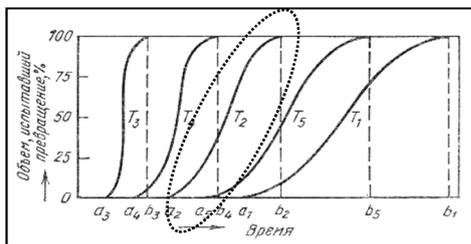
Кинетическая кривая распада аустенита при постоянной температуре



- Важны 4 участка кривой:
- 1 – инкубационный период
 - 2 – нарастание скорости
 - 3 – максимальная скорость
 - 4 – затухание

- Две особенности кинетической кривой распада аустенита:
1. Начинается не с нуля, есть опер.инкубационный период
 2. Процесс распада аустенита очень долгий, поэтому шкала «время» изображается в логарифмической шкале

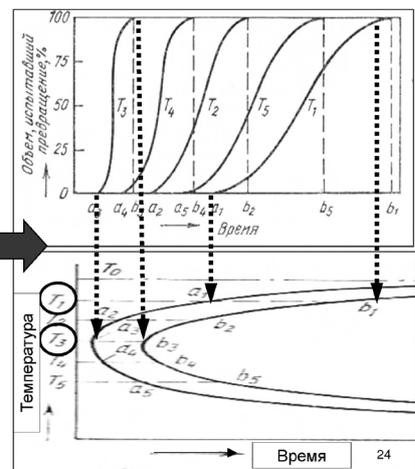
Кинетические кривые распада аустенита при различных постоянных температурах



Характер кинетических кривых однотипен. Но скорость превращения и инкубационный период у каждой кривой разный. При высоких и низких температурах скорость превращения мала. Высокая скорость - при средних температурах (обведено).

23

Построение С-образной диаграммы по ряду кинетических кривых (перенос всего двух точек: время начала и время конца превращения).



3. ADI

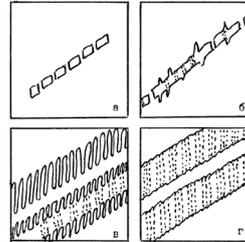
Механизм бейнитного превращения Микроструктура

25

Примерное описание механизма бейнитного превращения

(по Кривошееву А.Е., Тарану Ю.Н., Буниной Ю.К.)

Кристаллы α -фазы возникают вдоль определенных плоскостей аустенита и имеют форму, близкую к равноосной (а). Происходящее перераспределение углерода обогащает углеродом окружающий аустенит, который при закалке образцов не претерпевает мартенситного превращения. Наиболее сильно обогащаются углеродом участки аустенита, разделяющие частицы α -фазы в цепочках

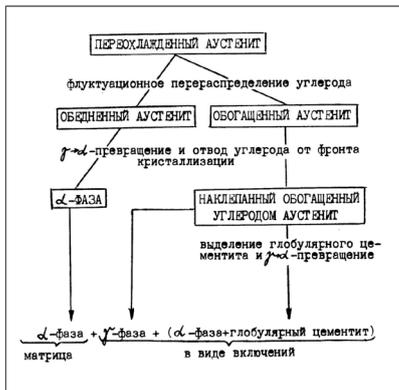


Здесь выделяются мельчайшие кристаллы карбидов, а α -частицы прорастают сквозь обедненный углеродом аустенит до сочленения в пластины (б). С понижением температуры кристаллы α -фазы возникают в большем количестве в виде набора тонких параллельных пластин (в). Тонкие участки аустенита между пластинами сильно обогащены углеродом. В них наиболее облегчено выделение частиц карбидов (г)

26

Схема стадий бейнитного превращения

(по Бунину К.П., Малиночке Я.Н.)



27

В чем причины столь значительного упрочнения ADI? Несколько предположений

(из презентации А.Нозалы в Минске, 20.10.2016)



Упрочнение феррита, связанное с высокой плотностью дислокаций (видны множество дислокаций)

Упрочнение аустенита при легировании за счет измельчения зерен и двойникования (видны двойники в аустенитном зерне)

28

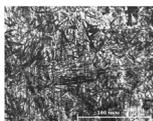
Особенности протекания бейнитного превращения

Сочетание

- а) мартенситного механизма $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода (бездиффузионного) и
- б) диффузионного механизма перераспределения углерода

Особенности структуры - формируются две фазы:

- 1) Бейнит (феррито-карбидная смесь) - обеспечивает прочность
- 2) Остаточный аустенит - обеспечивает пластичность



29

Металлография: как выглядит бейнит под микроскопом (по сравнению с мартенситом)



это мартенсит:

Особенности мартенситных игл:

- похожи на строительные фермы или молнии.
- их возникновение происходит как рикошет пули о препятствие.

это бейнит:

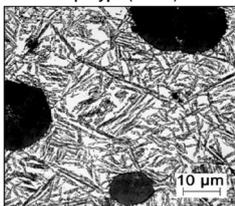
Особенности бейнитных игл:

- пакетное строение
- иглы выглядят скорее изолированными, чем представляют собой непрерывную цепочку, в виде «ферм» или «молний»

30

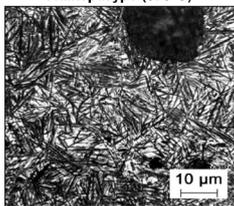
Микроструктура бейнита

Типичная микроструктура при закалке на бейнит при низкой температуре (260°C)



При низких температурах закалка на бейнит образуется игольчатая ферритная фаза с небольшим количеством остаточного аустенита. При самых низких температурах закалки на бейнит структура может также содержать некоторое количество мартенсита. Этот тип микроструктуры может обеспечить высокую прочность на растяжение и твердость, но лишь ограниченную пластичность.

Типичная микроструктура при закалке на бейнит при высокой температуре (375°C)



По мере того как температура закалки на бейнит постепенно увеличивается, феррит становится грубее и растет количество остаточного аустенита (до ~ 40%). Это приводит к существенному увеличению пластичности и снижению прочности и твердости.

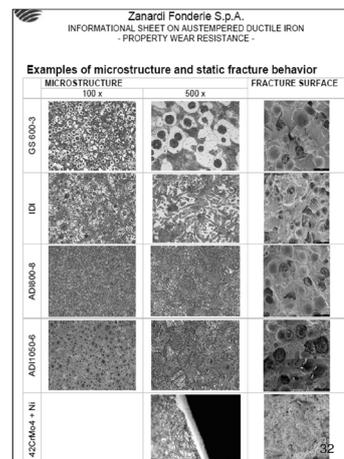
31

4. ADI:

Принципы легирования Химический состав Марки

33

Пример сравнительного атласа микроструктур ADI и других материалов



(из проспекта фирмы Zanardi Fonderie S.p.A)

32

ADI: Химический состав

В качестве легирующих компонентов для увеличения прокаливаемости и стабилизации аустенита обычно используют **никель, медь, марганец и молибден**

Наиболее употребимый диапазон химического состава бейнитного чугуна (% масс.):

углерод - 3,2-3,8
кремний - 2,0-2,4
марганец - 0,2-0,5
никель - 0,8-2,5
медь - 0,5-1,5
молибден - 0,2-0,8

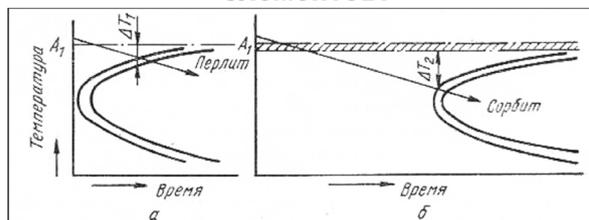
34

Роль легирующих элементов в ADI

- **Кремний:** стабилизатор феррита – повышает и расширяет температурный интервал превращения феррита в аустенит
- **Медь:** способствует образованию перлита в литой микроструктуре и замедляет растворение графитных глобул во время аустенизации
- **Никель:**
 - ✓ Стабилизирует аустенит и увеличивает прокаливаемость за счет замедления превращения аустенита в перлит при охлаждении
 - ✓ Понижает температуру превращения феррита в аустенит при нагреве
- **Молибден:**
 - ✓ Повышает прокаливаемость за счет замедления превращения аустенита в перлит при охлаждении
 - ✓ Сегрегируется при затвердевании, образует стабильные карбиды и усиливает микропористость (> 0.2%)

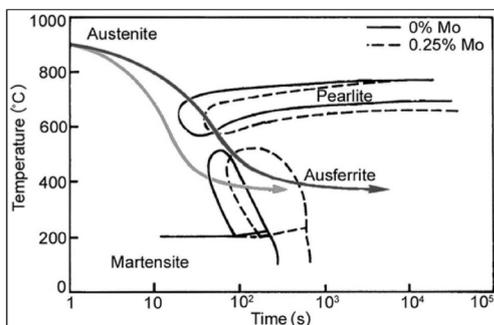
35

Влияние на С-диаграмму легирующих элементов:



- Большинство легирующих элементов замедляет диффузию.
- Соответственно, С-кривые сдвигаются вправо.

Пример влияния одного из важнейших легирующих элементов (молибдена) на формируемые комбинации структур ADI



С-кривая сдвигается вправо, следовательно ADI можно получить при меньшей скорости охлаждения

37

Соответствия между марками ADI в различных стандартах

ASTM 897-90 (1997)	SAE J2477O (2001)	EN1564 (1997)	ISO 17804 (Draft)
		EN-GJS-800-8	JS/800-10
850/550/10			
	AD 900		JS/900-8
		EN-GJS-1000-5	
1050/700/7	AD 1050		JS/1050-6
1200/850/4	AD 1200	EN-GJS-1200-2	JS/1200-3
1400/1100/1	AD 1400	EN-GJS-1400-1	JS/1400-1
			JS/HV400
1600/1300/-	AD 1600		JS/HV500

38

Механические свойства марок ADI по ASTM 897-90

Grade	Tensile strength R_m MPa (min.)	0,2% Proof stress $R_{p0.2}$ MPa (min.)	Elonga-tion A_2 % (min.)	Impact energy (unnotched) J (min.)	Brinell hardness range HB (informative)
850/550/10	850	550	10	100	269-321
1050/700/7	1050	700	7	80	302-363
1200/850/4	1200	850	4	60	341-444
1400/1100/1	1400	1100	1	35	388-477
1600/1300/-	1600	1300	-	-	444-555

39

5. ADI:

**Технологии термической обработки
Свойства**

40

Возможны два способа получения чугунов с аустенито-бейнитной структурой:

- 1) Сразу в литом состоянии** за счёт индивидуально подобранного легирующего комплекса, а также конструкции отливки и технологии литья. Это детали массового производства, не требующие механической обработки. При этом дополнительные затраты на разработку конструкции и технологии изготовления отливки, а также на дополнительное легирование такими элементами, как никель и молибден, компенсируются исключением затрат на достаточно сложную термическую обработку. Но номенклатура таких отливок весьма ограничена.
- 2) Дополнительной термической обработкой** литых заготовок. Более часто используют этот метод. При этом на стадии изготовления отливки необходимо грамотно подобрать химический состав и технологические параметры для получения в литой заготовке оптимальной структуры с точки зрения механической и термической обработки.

41

Особенность термообработки на аустенито-бейнитную структуру

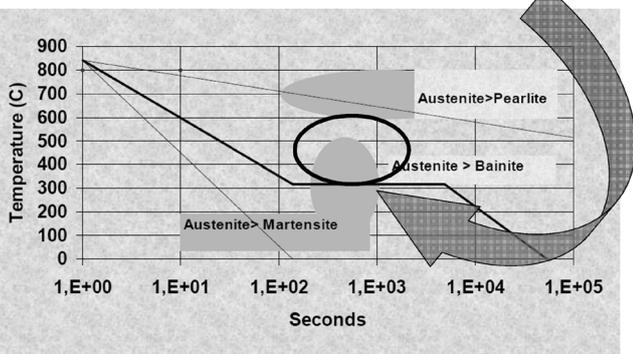
Задача: прервать распад аустенита на определенном этапе охлаждения

Этапы термообработки:

1. Нагрев, доведение структуры до аустенитного состояния.
2. Быстрое охлаждение, но не до комнатной, а до температуры ниже выступа на С-образной кривой. За счет этого на определенной стадии прерывается распад аустенита
3. Изотермическая выдержка, температура и продолжительность которой определяют соотношение аустенита и бейнита в структуре

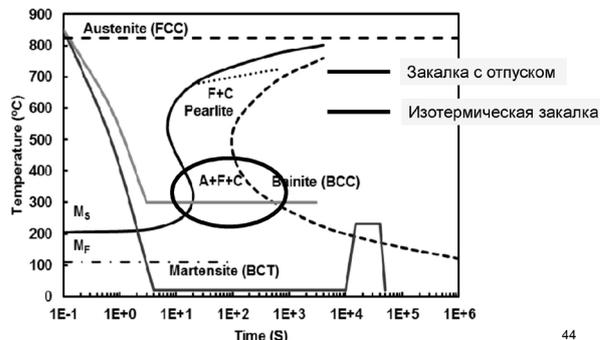
42

При термообработке необходимо зафиксировать совершенно определенную структуру



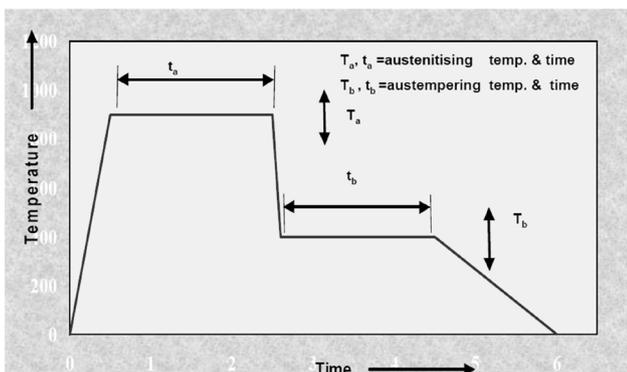
Черная линия – оптимальный режим охлаждения 43

Сравнение кривых охлаждения при обычной закалке с отпуском и изотермической закалке



44

Основные параметры термообработки ADI



45

Выбор параметров термической обработки и структур для конкретных деталей

- 1) аустенизация (нагрев до температур около 950 °C)
- 2) изотермическая закалка - очень быстрый (до начала мартенситного превращения) перенос в среду с температурой 300-500 °C + последующая выдержка

При температурах изотермической выдержки получали два основных структурных типа бейнита:

- так называемый «нижний» (в интервале 280–350 °C)
- «верхний» (ориентировочно 350–450 °C)

Детали со структурой матрицы «нижний бейнит» обладают **максимальными прочностью, твёрдостью и износостойкостью** при хорошей ударной вязкости и относительном удлинении,

а детали со структурой матрицы «верхний бейнит» имеют высокую прочность наряду с **высокими ударной вязкостью и относительным удлинением**

46

Самым важным для практики получения ответственных изделий является то, что, изменяя соотношение бейнита и аустенита в структуре чугуна, можно получать сочетание **одновременно высокой прочности с повышенной пластичностью.**

Бейнит - обеспечивает прочность, остаточный аустенит - обеспечивает пластичность.

47

Различают два основных структурных типа бейнитов в чугунах – так называемые нижний и верхний, которые получают, соответственно, при более низких (в интервале 280 - 350°C) и более высоких (ориентировочно – 350 - 450°C) температурах закалки и изотермической выдержки.

Детали со структурой матрицы нижнего бейнита обладают максимальными прочностью, твёрдостью и износостойкостью при хорошей ударной вязкости и относительном удлинении,

Детали со структурой матрицы верхнего бейнита – высокой прочностью наряду с высокими ударной вязкостью и относительным удлинением.

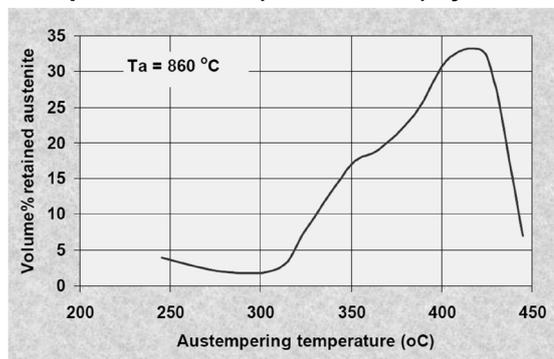
48

Примерный диапазон механических свойств чугуна со структурой верхнего и нижнего бейнита

Тип структуры бейнита в чугуне	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительн. удлинение, %	Твердость, HRC	Ударная вязкость, МДж
Нижний бейнит	1100-1500	1-4	42-48	0,2-0,5
Верхний бейнит	800-1200	3-10	36-45	0,2-0,4

49

Пластичность определяется количеством нераспавшегося (остаточного) аустенита



50

6. Промышленное производство ADI: состояние и перспективы

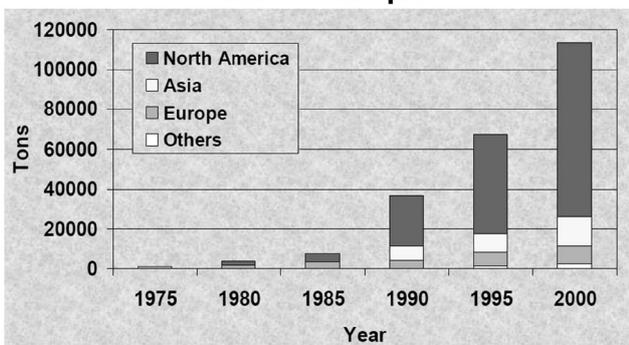
После того, как на опытных образцах были достигнуты значения предела прочности при растяжении на уровне 1500 МПа и относительного удлинения до 10%, началось широкое освоение высокопрочного бейнитного чугуна. В настоящее время в промышленных масштабах выпускаются (в частности, фирмами «General Motors» и «Ford») сотни типоразмеров деталей, причем за рубежом наиболее массовыми изделиями являются зубчатые колеса.

Активнейшим образом велись работы по освоению изделий из бейнитного чугуна в России, в частности, на автомобильных заводах ВАЗ и КамАЗ. Большое внимание внедрению бейнитного чугуна уделял директор КамАЗа Н.И. Бех. В России была разработана комплексная программа "Разработка и внедрение аустенито-бейнитных чугунов с шаровидным графитом и технологии получения из них литых деталей в автомобилестроении", участниками которой являются АО "КамАЗ", НХМА "Авангард" (Москва), НТКЦ "САНТОКАМ" (С-Петербург), ЦНИИ Материалов (С-Петербург) и другие - всего 25 организаций.

51

52

Динамика производства изделий из ADI в мире



53

7. Оборудование для ADI: особенности

54

Особенности термического оборудования

Наличие двух печей: для аустенизации и изотермической закалки.
Проблема окисления и обезуглероживания.

Опыт экспериментов ФТИ на МАЗе.

Термическую обработку отливок на бейнит производили в термическом отделении инструментально-штампового производства, где имелся широкий выбор соляных и селитровых ванн и электропечей. Необходимо было подобрать две близкорасположенные 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 проводились 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 модели Н-519 и рядом расположенную селитровую ванну модели Н-2334. Из-за окислительной атмосферы в печи и возможного окисления поверхности деталей во время выдержки, ее продолжительность была сокращена до 0,5—1 часа по сравнению с рекомендуемыми для полноты прохождения процесса аустенизации 3-4 часов.

Особое внимание должно быть уделено циркуляции в соли бака-охлаждителя для обеспечения однородности процесса и конечных свойств материала. Одним из преимуществ этого типа печи является то, что она может быть для других тепловых обработок, что полезно, когда пропускная способность АДИ непостоянна.

Если состояние поверхности и обезуглероживание допустимо, можно использовать менее сложное оборудование, с высокой температурой печи без контроля атмосферы, но это не подходит для большинства автомобильных деталей.

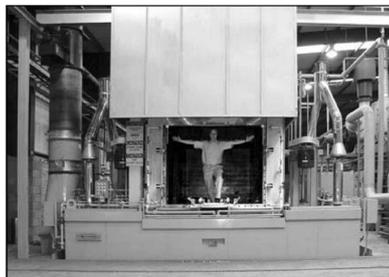
8. АДИ:

Освоенные типоразмеры деталей

59

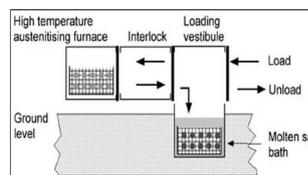
Проблема окисления при аустенизации

Пример одной из самых больших в мире печей для безокислительного нагрева и последующей закалки на бейнит, которая недавно была установлена АДИ Ltd. (Великобритания) стоимостью более \$ 1,0 млн. Можно обрабатывать детали габаритом до 1,8 м и весом до 2,75 т.



Закалка на бейнит на западных заводах:

- ❖ Различные заводские конструкции могут быть использованы для промышленного производства АДИ. Наиболее широко используемый метод "атмосфера к соли", в которой детали аустенизируются в печи с контролируемой атмосферой, чтобы предотвратить окисление и обезуглероживание, а затем помещают в банки с расплавленной солью, где происходит изотермическая реакция.
- ❖ Используются различные смеси нитридов и нитратов натрия и калия.
- ❖ Специализированная "ausquench" печь. Это вид закрытых закалочных печей, используемых для цементации сталей, но обычный закалочный бак заменен нагретой расплавленной солевой ванной, как правило, с добавлением воды.
- ❖ Они установлены по всему миру либо в литейных заводах или специализированных участках.



Широчайшая гамма слабо-, средне- и высоконагруженных прямозубых и косозубых шестерен



Шестерни, изготовленные в институте CMRDI для египетской компании Iron & Steel Co

(из презентации А.Нюфеля в Минске, октябрь 2016)

60

Детали автомобильной и железнодорожной подвески



Из презентации фирмы Zanardi Fonderie S.p.A)



Детали трансмиссии



Из презентации фирмы Zanardi Fonderie S.p.A



62

Почвообрабатывающий инструмент



из презентации А.Нофаля в Минске, октябрь 2016

9. Механическая обрабатываемость ADI:

некоторые проблемы

64

Особое внимание следует уделить материалу инструмента, его геометрии и использования смазочно-охлаждающих жидкостей путем обсуждения с соответствующими поставщиками.

Примеры:

Нитрид кремния керамики с многослойным CVD покрытием дал наименьшее износ при 800 об/мин, но CBN и PCD инструменты не подходят.

Износостойкие твердых сплавов (K10, на основе карбидов вольфрама) с износостойким покрытием (Al₂O₃ TiCN или TiAlN) могут быть успешно использованы при низких скоростях резания,

Al₂O₃ керамика, смешанная керамика и керамические армированные материалы дали хорошие результаты при более высоких скоростях резания.

Рекомендуется, чтобы обрабатываемое изделие было жестко закреплено и жесткий держатель инструмента должен быть использован для уменьшения вибраций во время обработки и тем самым уменьшить износ инструмента, улучшить качество поверхности и уменьшить отклонения размеров.

10. ADI в Беларуси:

Одна из попыток применения

66

Введение. Состояние производства высокопрочного чугуна в Беларуси

Магистральным направлением в Беларуси является переход отливок с материалов сталь, СЧ, КЧ на высокопрочный чугун (ВЧ) с задачей выпускать до 100 тыс. тонн заготовок в год.

Запланировано строительство двух литейных заводов — одного в г. Столбцы (там уже несколько лет действует первая очередь) от Минского моторного завода, и второго - в г. Жодино от предприятия «Амкордор».

Пример Минского автомобильного завода:

С 2006 года прекращен выпуск энергоемкого ковкого чугуна, вместо него МАЗ перешел на выпуск высокопрочного чугуна, что позволило снизить энергозатраты на производство автомобилей. Реконструкция литейного производства позволит обеспечить выпуск в 2015 году стальных отливок 19,3 тыс. тонн, чугунных отливок – 18,6 тыс. тонн, обеспечит внедрение современного оборудования и технологий, что позволит повысить качество и снизить себестоимость производства отливок, увеличить экспортный потенциал Республики Беларусь.

67

Физико-технический институт выполнял в Беларуси работы по ADI в рамках заданий двух государственных научно-технических программ:

- 1) «Технологии», задание «Разработать и освоить литейную и литейно-деформационную технологии изготовления зубчатых колес из бейнитного чугуна»
- 2) «Белавоттракторостроение», задание «Разработать опытно-промышленную технологию изготовления конических шестерен трансмиссии автомобиля МАЗ из бейнитного чугуна»

68

Опытно-промышленные работы ФТИ по внедрению шестерен из бейнитного чугуна на МАЗе (взамен стали 20ХНЗА)

С использованием сложившегося мирового опыта, была сделана попытка применить бейнитный чугун к условиям литейного производства Минского автомобильного завода и к конкретным деталям типа средних и крупных зубчатых колес

Немаловажным оказалось и то, что МАЗ на тот момент был заинтересован иметь в своем распоряжении импортозамещающую технологию, альтернативную традиционной, основанной на механической обработке проката легированной стали 20ХНЗА, поставляемой из России.

Промышленное опробование технологии получения ответственных автомобильных деталей из чугуна / Дудецкая Л.Р., Покровский А.И. // Вестн. Национальной академии наук Беларуси, серия физико-технических наук (научный журнал). Минск: «Наука и техника». - 2003. - № 2. - С. 47-53.

69

Опытно-промышленные работы на МАЗе

Технологию реализовали на имеющихся производственных площадях завода

Первоначально была разработана и реализована опытная технология плавки и разливки высокопрочного чугуна в объеме 300 кг

Литые заготовки передавали в цех редукторов, где производили их предварительную и окончательную механическую обработку

Обработанные детали подвергались изотермической закалке на термическом участке инструментально-штампового производства, после чего были переданы для прохождения производственных испытаний в испытательный центр

Бейнитный чугун: опыт получения и применения / Дудецкая Л.Р., Покровский А.И., Гаухштейн И.С., Демин М.И., Гурченко П.С. // Автомобильная промышленность М.: «Машиностроение». - 2001. - № 11. - С. 33-35.

70

Опытно-промышленные работы на МАЗе

С учетом полученных результатов была разработана опытно-промышленная технология изготовления зубчатых колес

Она включала:

- ✓ выплавку высокопрочного чугуна объемом 3 тонны
- ✓ предварительную термообработку
- ✓ горячую пластическую деформацию
- ✓ предварительную и окончательную механическую обработку на автоматических линиях
- ✓ шлифовку
- ✓ изотермическую закалку в соляных ваннах
- ✓ притирку зубьев

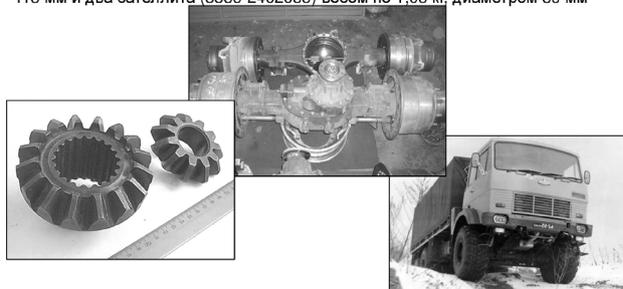
Термообработка на бейнитную структуру деталей из чугуна / Дудецкая Л.Р., Покровский А.И., Гаухштейн И.С., Демин М.И., Гурченко П.С. // Литье и металлургия. Минск: «Интерфаундри». - 2002. - № 1. - С. 45-49.

71

Опробование на средних зубчатых колесах МАЗ

Шестерни дифференциала автомобиля МАЗ 5336

Эта зубчатая пара, расположена в заднем мосту автомобиля и включает в себя шестерню полуоси (5336-2402050) весом 3,3 кг, диаметром 118 мм и два сателлита (5536-2402055) весом по 1,05 кг, диаметром 89 мм



Использование высокопрочного бейнитного чугуна для изготовления зубчатых колес. / Покровский А.И., Дудецкая Л.Р. // Литье и металлургия. 2015, № 2 (79), с. 126-134.

72

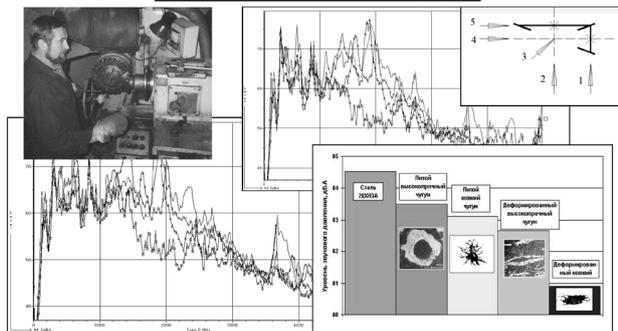
Опробование на крупных зубчатых колесах МАЗ

Шестерни главной зубчатой пары трансмиссии автомобиля МАЗ-5551, ведущую шестерню (вал-шестерню) (дет. 5551-2402017) массой 10,4 кг и ведомую шестерню (дет. 5551-2402060) массой 13,8 кг



Статическая прочность шестерен трансмиссии автомобиля МАЗ из чугуна / Покровский А.И. // Машиностроение и техносфера. Сборник научных трудов Донецкого национального технического университета. В 5-ти томах. Украина, г.Донецк: Изд. «Технополис». - 2007. Т. 3. - С. 186-191.

Сравнение акустических характеристик изделий из стали 20ХН3А и чугуна



Влияние формы графитовых включений на акустические характеристики изделий из литого и деформированного чугуна / Покровский А.И., Чаус А.С., Куновский Э.Б. // «Металловедение и термическая обработка металлов». М.: «Фоллиум», № 7 (673), июль. 2011. С.3 - 10. 75

Выводы и рекомендации по результатам работ ФТИ на МАЗе

Подтверждены общемировые данные об эффективности применения бейнитного чугуна для изготовления шестерен.

Показано, что высокопрочные чугуны с аустенито-бейнитной структурой - перспективный материал для изготовления ответственных машиностроительных изделий.

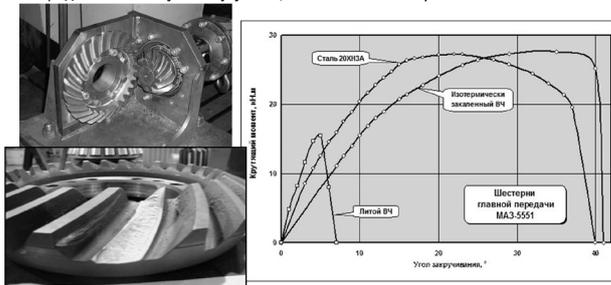
Получаемые высокие характеристики позволяют заменить чугуном сталь, экспортируемую из-за рубежа и использовать его при изготовлении широкого круга изделий.

Эти изделия могут быть высоконагруженными, достаточно массогабаритными, но компактными (под компактностью мы понимаем то, что они имеют размеры по всем трем осям координат близкие, или соотносимые между собой). Это, например, шестерни, гильзы, втулки. Что касается длинномерных деталей, то использование чугуна для них, по-видимому, неэффективно.

Бейнитный чугун или стальной прокат: границы возможностей при изготовлении ответственных изделий. Покровский А.И., Ласковнев А.П., Дудецкая Л.Р. // Инженер – механик, 2016, № 1(70) январь-март, с. 9-21. 77

Стендовые прочностные испытания в испытательном центре МАЗ до разрушения

Показано, что в большинстве случаев при одинаковой нагрузке в первую очередь ломался зуб не чугунной, а стальной шестерни.



Прочностные характеристики шестерен трансмиссии автомобиля МАЗ из чугуна / Покровский А.И. // Машиностроение: Республ. межведомств. сб. научных трудов. Минск: «Технопринт». - 74 2002. Выпуск № 18. - С. 461-466.

Пример расчета эффективности для условий МАЗа

- 1) Экономия импортируемого проката 20ХН3А, достигающая по детали "сателлит" 200 тонн на программу;
- 2) Снижение массы деталей на 9% за счет меньшей плотности чугуна по сравнению со сталью, что позволяет облегчить каждую шестерню на 700г;
- 3) Снижение затрат на термическую обработку за счет устранения цементации;
- 4) Уменьшение трудоемкости механической обработки и расхода инструмента за счет получения более точной заготовки и лучшей обрабатываемости чугуна.
- Предполагаемый экономический эффект от внедрения новой технологии при изготовлении годовой программы зубчатой пары сателлитов дифференциала составляет 442400 долларов США.

76

Эпилог

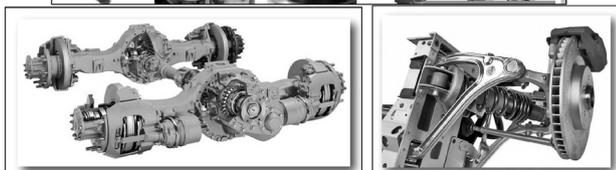
И все таки, откуда же взялся тот самый стереотип? Который так крепко засел в головах большинства конструкторов и технологов из СНГ: «чугун – это что-то такое, хрупкое, некачественное, малоответственное, в общем, несерьезное ...»

Может быть он идет родом еще из нашего детства, когда мы просыпались, а мама гремела чугунами в печи ... ?



78

Что ж, сейчас нам предстоит решить: оставаться «Емелей на печи», или догонять цивилизованный мир, где изделия из чугуна уже лет 50 успешно вытесняют высококачественную легированную сталь, а чугун служит основным материалом для самых ответственных изделий



«Chrysler», «Ford Motor»: примеры деталей из бейнитного чугуна

79

Контакты

Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси
220141, Беларусь, г.Минск, ул.Купревича, 10.

E-mail: arturu@tut.by, pakrouski@mail.ru

+375 (29) 663-58-38 (Velkom)

+375 (29) 861-29-35 (МТС)

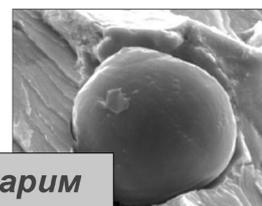
Покровский Артур Игоревич

81

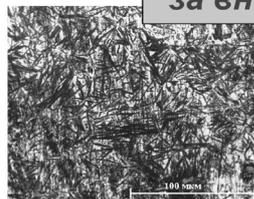
Резюме

- ❖ В условиях Беларуси, где по данным Министерства промышленности сейчас насчитывается более 60-ти организаций, располагающих литейными цехами, полным ходом реализуется программа перехода на ВЧ, а термические отделения имеются практически на каждом машиностроительном заводе, высокопрочные бейнитные чугуны (ADI) могут составить существенную конкуренцию стальному прокату.
- ❖ Многие российские предприятия уже освоили технологию получения заготовок из ADI и готовы поставлять их на белорусский рынок.

80



Благодарим
за внимание!



82