



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-29-37>
УДК 669.131.7

Поступила 20.08.2022
Received 20.08.2022

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫХ АУСФЕРРИТНЫХ (БЕЙНИТНЫХ) ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЧУГУНОВ

А. И. ПОКРОВСКИЙ, Физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: art@phti.by

Рассмотрена материальная структура производства отливок в мире, общие объемы выпуска которых превысили 112 млн. т. Показана ведущая доля чугунов и, в частности, рост выпуска высококачественных и высокопрочных чугунов с шаровидным графитом. Описана устойчивая тенденция замены для ответственных машиностроительных изделий легированного стального проката на Austempered Ductile Iron (ADI) – высокопрочный чугун с шаровидным графитом, изотермически закаленный на аусферритную (бейнитную) структуру. Рассмотрена динамика цен на основные легирующие элементы ADI-чугунов (молибден, никель и медь, суммарное количество которых в сплаве достигает 5%) и показано, что ее рост устойчиво положительный.

Цель работы – разработка концепции экономного легирования ADI-чугунов (суммарное содержание молибдена, никеля и меди – не более 2%), при котором сохранялась бы удовлетворительная прокаливаемость и одновременно снижалась себестоимость. Указанная цель реализовывалась путем снижения до минимума содержания наиболее дорогого элемента – молибдена.

Пониженное содержание основной «триады» легирующих элементов компенсировали микродобавками стронция (бария), ванадия, бора, ниобия, добавками мисметалла. Предложено несколько групп экономнолегированных чугунов: 1) низконикелевый и низкомолибденовый с повышенным содержанием меди (до 1,8%) и добавками ванадия; 2) безмолибденовый с микродобавками бора; 3) безмолибденовый с микродобавками ниобия и бора; 4) полностью безмолибденовый с минимальным легированием никеля и меди.

Показано, что обработка давлением наряду с приданием изделию необходимой формы оказывает влияние на кинетику структурно-фазовых превращений и действует аналогично легированию Mo и Ni, сдвигая C-образную кривую вправо. Следовательно, аусферритную структуру можно получить при меньшей скорости охлаждения.

Механические свойства при таком легировании и использовании пластической деформации составляют: предел прочности 1100–1500 МПа, относительное удлинение – 2–4% (нижний бейнит), предел прочности 800–1100 МПа, относительное удлинение – 4–7% (верхний бейнит).

Ключевые слова. Чугун, микроструктура, аусферрит, бейнит, изотермическая закалка, молибден, никель, медь, микролегирование.

Для цитирования. Покровский, А. И. Концепция создания экономнолегированных аусферритных (бейнитных) высокопрочных чугунов / А. И. Покровский // *Литье и металлургия*. 2022. № 4. С. 29–37. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-29-37>.

CONCEPT FOR DEVELOPMENT OF ECONOMICALLY ALLOYED AUSFERRITIC (BAINITIC) DUCTILE CAST IRONS

A. I. POKROVSKY, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, 10, Kuprevich str. E-mail: art@phti.by

The distribution of the castings production in the world, whose total output is more than 112 million tons, is considered. A steady trend to the replacement of rolled alloy steel, which is used for critical engineering products, by Austempered Ductile Iron (ADI) is outlined. The latter is ductile cast iron with globular graphite, which is austempered (isothermally quenched) to produce ausferritic (bainitic) structure. The dynamics of prices for main alloying elements in ADI (molybdenum, nickel and copper, whose total amount in the alloy reaches 5%) is considered and their steady growth is outlined.

The research goal is to develop a concept of economical alloying of ADI (the total content of Mo, Ni and Cu should not exceed 2%) retaining sufficient hardenability and substantially decreasing the cost price. The goal is attained by decreasing the content of the most expensive alloying element, molybdenum, to a minimal level along with the use of microalloying and applying one of the methods of hot plastic deformation to the casting.

The reduced content of the main 'triad' of alloying elements is compensated by microadditives of strontium or barium, vanadium, boron, niobium and the addition of misch metal. Several groups of economically alloyed cast irons are proposed: (1) low-nickel and low-molybdenum with increased content of copper (up to 1.8%) and the addition of vanadium, (2) molybdenum-free with microadditive of boron, (3) molybdenum-free with microadditives of niobium and boron, and (4) molybdenum-free minimally alloyed with nickel and copper.

It is shown that plastic deformation, along with giving the product the required shape, affects the kinetics of structural-phase transformations. and acts similarly to alloying with Mo and Ni, shifting the TTT-curve to the right. Therefore, the ausferritic structure can be obtained at a lower cooling rate.

The mechanical properties with such alloying and the use of plastic deformation are the following: ultimate tensile strength 1100–1500 MPa and elongation to failure 2–4% for lower bainite; ultimate tensile strength 800–1100 MPa and elongation to failure is 4–7% for upper bainite.

Keywords. Cast iron, microstructure, ausferrite, bainite, austempering, molybdenum, nickel, copper, microalloying.

For citations. Pokrovsky A.I. Concept for development of economically alloyed ausferritic (bainitic) ductile cast irons. Foundry production and metallurgy. 2022, no. 4, pp. 29–37. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-29-37>.

Несмотря на кризисные явления в мире, в 2022 г. металлургическая отрасль работала относительно стабильно, производство металлов и сплавов снизилось к аналогичному периоду 2021 г. незначительно, не более чем на 3%. Годовой мировой объем выпуска стального проката составил около 1,95 млрд. т (данные «World Steel Association» за 2021 год), а объем выпуска литья во всем мире превысил 112 млн. т, из них доля чугунных отливок составила 70% (данные «Modern Casting» за 2019 г. [1]). Таким образом, высокоуглеродистые сплавы железа, известные еще с первого тысячелетия до нашей эры, и в XXI веке остаются основными и самыми востребованными литыми конструкционными материалами. Чугунное литье с большим отрывом опережает все остальные литейные материалы, в частности, алюминий, занимающий по объему выпуска второе место, и стальные отливки (третье место) (рис. 1) [2].

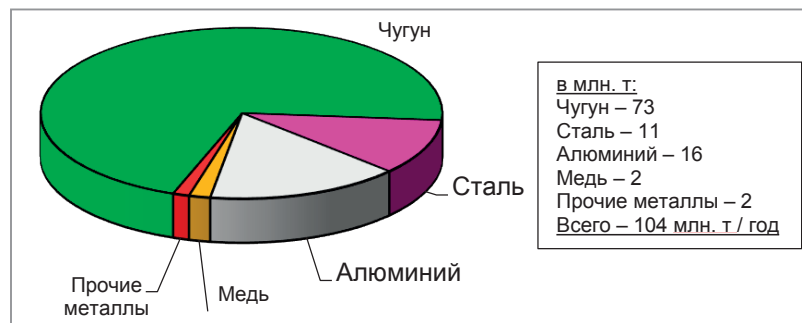


Рис. 1. Структура мирового производства отливок по видам материалов (по данным журнала «Modern Casting» на декабрь 2016 г. [2])

Рост доли высококачественных и высокопрочных чугунов

Актуальность исследований в области чугунов и на сегодняшний день не вызывает сомнений. Гораздо важнее то, что структура потребления сплавов существенно перераспределяется, наблюдается устойчивый спрос на все более высококачественные марки сталей и чугунов с прочностью выше 1000 МПа. В настоящее время общей мировой тенденцией становится расширение областей применения чугунов от несложных и малоответственных изделий до все более высоконагруженных и ответственных. Соответственно доля выпуска низкокачественных серых чугунов с пластинчатым графитом уменьшается, наблюдается устойчивый рост применения в машиностроении наиболее высококачественных марок высокопрочных чугунов (ВЧ).

Резкая переориентация на выпуск чугунов высокопрочных марок произошла на рубеже 70–80-х годов XX века. Катализатором этому процессу послужило открытие Keith Dwight Millis, которое 7 мая 1948 г. было представлено мировому сообществу на съезде литейщиков США. К. Millis установил, что при введении небольших добавок магния в ковш на стадии разлива чугуна в структуре формируются включения графита шаровидной формы, что обеспечивает существенный (до 2 раз) рост прочностных показателей. Патент К. Millis [3] положил начало эры высокопрочных чугунов.

На рис. 2 представлены диаграммы, иллюстрирующие насколько кардинально изменилась разница в материальной структуре мирового производства отливок за 50 лет (с 1996 по 2016 г.) и как уверенно высокопрочный чугун занял одну четверть рынка всех отливок.

Анализируя диаграммы, наглядно видно, что объемы производства стальных отливок несколько уменьшились, зато выросло (причем в несколько раз) производство отливок из двух материалов: алюминиевых сплавов и высокопрочного чугуна. В настоящее время более четверти всех отливок в мире составляют отливки из высокопрочного чугуна (рис. 2, б). При этом рост производства высокопрочного чугуна произошел именно за счет наиболее прочных его марок.

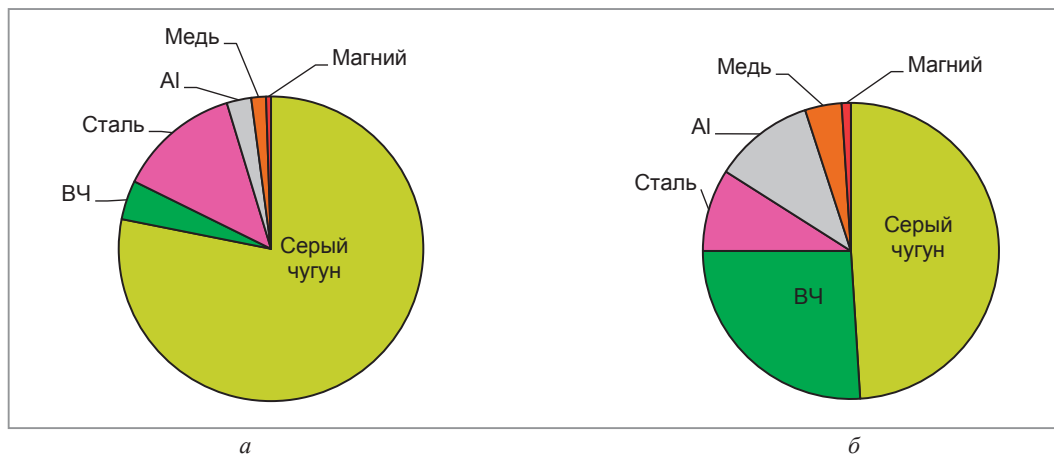


Рис. 2. Сравнение материальной структуры мирового производства отливок с интервалом в 50 лет [4]:
а – в 1996 г.; б – в 2016 г.

Из рис. 3 видно, что, несмотря на кризисные явления в мире, рост производства ВЧ в последние десятилетия имеет достаточно устойчивую динамику [4]. Анализ этого графика чрезвычайно показателен для металлургов-практиков, так как позволяет прогнозировать рост спроса на ВЧ в ближайшие годы, не менее важен он и для ученых-специалистов по чугунам, так как обосновывает актуальность углубленных исследований по тематике ВЧ.

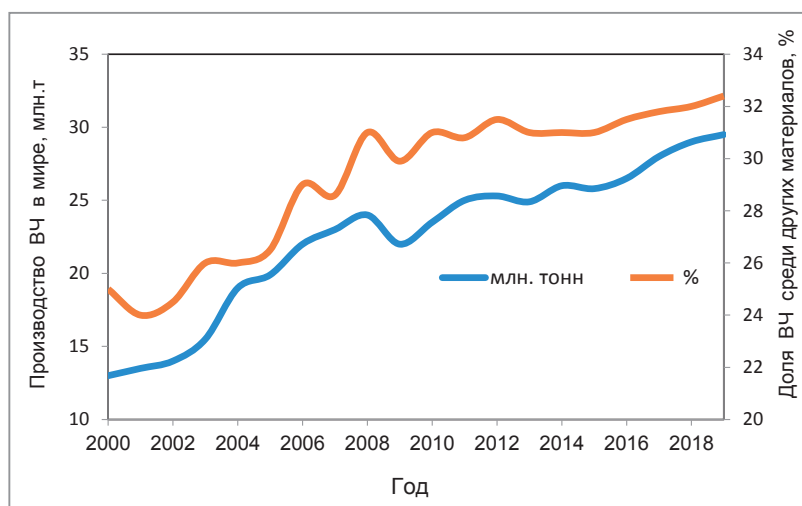


Рис. 3. Динамика мирового производства высокопрочного чугуна в натуральном (миллионы тонн) и процентном выражении (доля от всех других литых материалов) за последние годы [4]

Таким образом, сейчас происходит своего рода «второе рождение» чугунов в смысле переориентации областей их применения на весьма нагруженные детали машин в самых ответственных областях техники: автомобилестроении, железнодорожном, трубопроводном транспорте, станкостроении, судостроении. Помимо уже давно и хорошо известных изделий типа блоков цилиндров, поршневых колец, коленчатых и распределительных валов, можно привести новые примеры деталей, для которых конструктора еще недавно даже и не могли предположить использование высокопрочного чугуна. За рубежом ВЧ массово применяется для изготовления шестерен главной передачи автомобильной трансмиссии тяжелых грузовиков фирм «Форд», «Крайслер», деталей подвески железнодорожных вагонов (фирма «Zanardi»), почвообрабатывающего инструмента и др. Складывается интересная ситуация – литой материал за счет лучшей технологичности и высоких прочностных характеристик вытесняет легированный стальной прокат, прошедший несколько металлургических переделов, причем это происходит в самых передовых областях машиностроения.

Среди стран, наиболее крупных производителей отливок из высокопрочного чугуна, в настоящее время первое место, бесспорно, и с большим отрывом занимает Китай – 50% всего мирового производства, далее следуют США – 13%, Япония – 7%, Германия – 7%, Индия – 5%. Россия не входит даже в первую десятку производителей высококачественных марок чугуна, а Беларусь находится почти в самом конце

списка. В Беларуси в материальной структуре литья пока доминирует серый чугун (рис. 4), а весь объем выпуска отливок находится на уровне 250 тыс. т. Существующие в настоящее время в РБ мощности позволяют отлить 500 тыс. т в год.

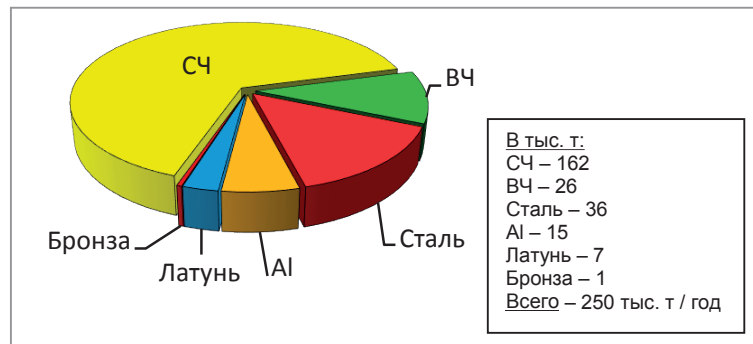


Рис. 4. Структура производимого в Беларуси литья по видам материалов (данные на 2018 г.) из Программы развития литейного производства Беларуси на период 2017–2030 гг.

Между тем, ученые Беларуси и, в частности Физико-технического института НАН Беларуси, внесли существенный вклад как в фундаментальную науку о металлургии и металловедении чугунов, так и в разработку новых марок высокопрочных чугунов. Практически одновременно с открытием К. D. Millis белорусским металловедом К. В. Горевым (25.09.1904–26.07.1988), работавшем в ФТИ с 1947 по 1988 г., вместе со своими учениками были выполнены работы по модифицированию чугуна церием, иттрием, магнием и уточнена диаграмма состояний «железо – углерод» при различных добавках кремния, существенно меняющем координаты эвтектической точки [5–7]. Для сплавов системы Fe-C-Al, прилегающих к железному углю, ими были построены новые диаграммы состояния в случае их равновесной кристаллизации.

Аусферритные высокопрочные чугуны

Следующим этапом расширения областей применения высокопрочного чугуна являлось формирование микроструктуры металлической матрицы не классического типа в виде феррито-перлитной смеси, а сочетание бейнита и остаточного аустенита, получаемое за счет специальной термической обработки. По западной терминологии этот новый класс чугунов называют Austempering Ductile Iron (ADI) – высокопрочный чугун с шаровидным графитом, закаленный на аусферритную структуру. В России пока в большинстве случаев используют старую терминологию, называя этот тип чугунов «бейнитным». Первые публикации по аустенито-бейнитному чугуну относятся к 50-м годам XX века. Большой вклад в 1970–1990 гг. 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 стремительное освоение высокопрочного бейнитного чугуна. Очень показательна в этом смысле диаграмма (рис. 5), на которой сопоставлена

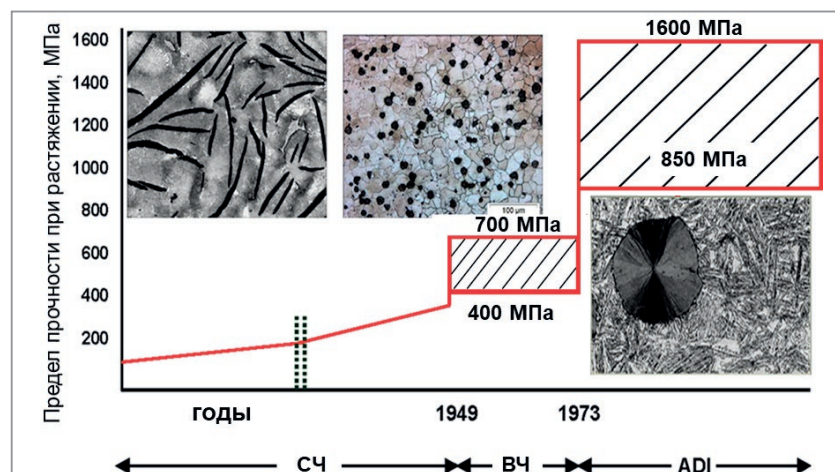


Рис. 5. Хронология совершенствования структуры и возрастания прочностных характеристик высокопрочных чугунов (из презентации А. Nofal, CMRDI, Египет)

хронология совершенствования микроструктуры этого класса чугунов с прочностными характеристиками. Из диаграммы видно, что с 70-х годов доминируют чугуны с прочностью 850–1600 МПа.

В Беларуси одним из родоначальников исследования аусферритных чугунов являлась Л. Р. Дудецкая и ее ученики [8, 9]. Ряд их разработок использовали на Минском автомобильном заводе [10, 11], были показаны перспективы и ограничения использования этого материала для изделий различной формы [12–14], доказано существенное снижение уровня шума при работе автомобильных шестерен по сравнению со стальными [15].

Рост мировых цен и необходимость экономного легирования аусферритных чугунов

В мире наблюдается рост спроса и соответственно выпуска высококачественных высокопрочных чугунов. Однако неизбежной «платой» за повышенные характеристики ADI-чугунов являются две серьезные проблемы: обязательное дополнительное легирование и сложная термическая обработка с многочасовой изотермической выдержкой. Для увеличения прокаливаемости и стабилизации аустенита обычно используется классическая триада легирующих элементов: никель, медь, молибден. Тенденции мировых цен на эти металлы показывают ежегодный устойчивый рост (сравним диаграммы на рис. 6), причем в моменты финансовых потрясений цены достигают пиковых значений (рис. 7).

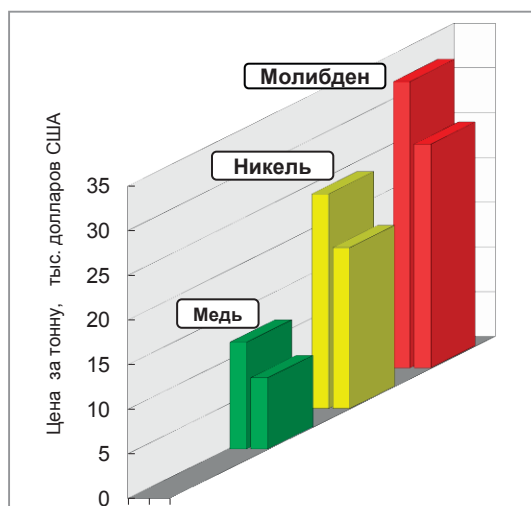


Рис. 6. Сравнение среднегодовых цен на молибден, никель, медь за 2020 г. (диаграммы на переднем плане) и за 2021 г. (на заднем плане)



Рис. 7. Динамика мировых цен на никель с начала 2020 г. по март 2022 г. (результаты торгов лондонской биржи)

На сегодняшний день наиболее употребляемый интервал легирования ADI-чугунов следующий: C – 3,2–3,8 мас. %; Si – 2,0–2,4; Mn – 0,2–0,5; Ni – 0,8–2,5; Cu – 0,5–1,5; Mo – 0,2–0,8 мас. %. Таким образом, суммарное содержание наиболее дорогих легирующих элементов (Mo, Ni, Cu) может достигать 5%. Причем если пытаться снижать содержание ключевых элементов, то в случае реализации классической технологии (литье модифицированного ВЧ + аустенизация + изотермическая закалка в соляных ваннах) неизбежны потери в механических свойствах.

Цель работы – разработка концепции экономного легирования ADI-чугунов.

Результаты и их обсуждение

Подход при разработке концепции экономного легирования заключался в снижении до минимума содержания наиболее дорогих элементов (суммарное содержание молибдена, никеля и меди не должно было превышать более 2%). Дополнительно использовали микролегирование и воздействие на отливку одним из способов горячей пластической деформации.

Предложено несколько групп экономнолегированных чугунов:

- 1) низконикелевый (до 0,2%) и низкомолибденовый (до 0,15%) с повышенным содержанием меди (до 1,8%) и добавками ванадия (до 0,1%);
- 2) безмолибденовый с микродобавками бора (0,01–0,05%);
- 3) безмолибденовый с микродобавками ниобия и бора;
- 4) безмолибденовый с минимальным легированием никеля и меди (суммарное содержание Ni + Cu – до 1,8%);

Пониженное содержание основной «триады» легирующих элементов компенсировано микродобавками ванадия, бора, ниобия, добавками стронция, мишметалла (см. таблицу).

Химические составы групп экономнолегированных аусферритных чугунов

Группа чугунов	1	2	3	4
Номер патента	23389	23393	22823	23331
Углерод	2,7–3,8	3,4–3,8	3,4–3,8	3,4–3,8
Кремний	2,1–2,9	2,0–2,4	2,0–2,4	2,0–2,4
Марганец	1,1–1,4	0,15–0,30	0,15–0,30	0,15–0,45
Медь	0,9–1,7	0,3–0,9	0,3–0,9	0,3–0,8
Никель	0,05–0,2	0,4–0,9	0,4–0,9	0,4–0,8
Молибден	0,05–0,15	-	-	-
Суммарное содержание Ni + Mo + Cu	1,0–2,0	0,7–1,8	0,7–1,8	0,7–1,6
Ванадий	0,02–0,1	-	-	-
Магний	0,03–0,06	0,03–0,06	0,03–0,06	0,03–0,06
Стронций/Барий	-	0,005–0,05	-	0,005–0,05
Ниобий	-	-	0,005–0,05	-
Бор	0,01–0,05	0,01–0,05	0,01–0,05	-
Мишметалл	-	0,05–0,5	-	-

Механические свойства при таком легировании и использовании пластической деформации составляют: предел прочности – 1100–1500 МПа, относительное удлинение – 2–4% (нижний бейнит), предел прочности – 800–1100 МПа, относительное удлинение – 4–7% (верхний бейнит).

Показано, что минимальным граничным показателем при легировании дорогостоящими элементами никелем и медью является значение 2%, причем в обязательной комбинации с микролегированием. С уменьшением этого количества происходит резкое падение в первую очередь прочностных свойств. Новизна предложенных химических составов защищена патентами [16–20].

Следующий элемент концепции основывался на том, что любое высокоэнергетическое воздействие (лазерное, плазменное, бомбардировка ионами и электронами) оказывает весьма эффективное влияние на структурное состояние твердого тела. Было принято решение использовать один из таких вариантов. Ранее в ФТИ НАН Беларуси в работах К. В. Горева [21], В. П. Северденко, В. В. Клубовича, А. В. Степаненко [22] показана эффективность влияния ультразвукового воздействия на процессы плавки и прокатки. В данной работе в качестве дополнительного высокоэнергетического воздействия использовали воздействие горячей пластической деформации на литую заготовку, в частности методы выдавливания и прессования.

Показано, что аустенизацию можно совмещать с нагревом заготовок под пластическую деформацию. Установлено, что для деформированного чугуна инкубационный период сократился в 3 раза в сравнении с литым. В деформированном чугуне больше нераспавшегося аустенита, поэтому общая твердость металлической матрицы у него ниже, чем у литого. Особенностью структуры металлической матрицы деформированного чугуна является более четко выраженная игольчатая форма пластин бейнита (сравним рис. 8, *a* и *б*). Причем наблюдаются образование и рост бейнитных пластин рядом с вытянутыми графитными включениями.

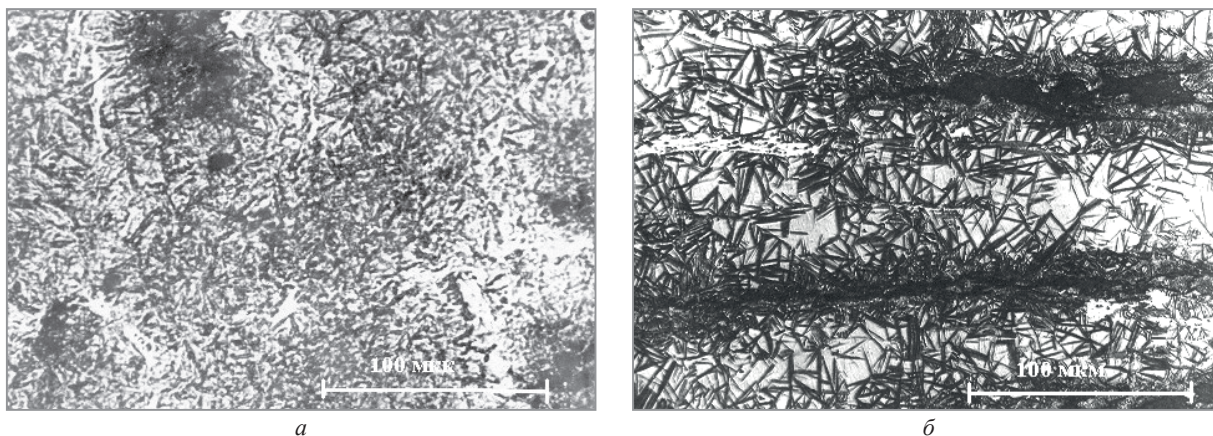


Рис. 8. Микроструктура литого чугуна (*a*) и деформированного методом горячего выдавливания (*б*) (продольное сечение) после изотермической закалки с 900 °С в селитровой ванне при 250 °С с выдержкой 2 ч. Травлено ниталем. х 600

Исследуя микроструктуру деформированного чугуна, показано, что обработка давлением наряду с приданием изделию необходимой формы оказывает существенное влияние на кинетику структурно-фазовых превращений. Установлено, что пластическая деформация действует аналогично легированию Mo и Ni, сдвигая С-образную кривую вправо. Следовательно, аусферритную структуру можно получить при меньшей скорости охлаждения. Пример изотермических кривых чугунов группы 1 приведен на рис. 9. Таким образом, в практическом смысле воздействие деформации приводит к сокращению продолжительности изотермической выдержки (обычно составляющей 2–4 ч) в 1,5–2,5 раза с соответствующей экономией электроэнергии.

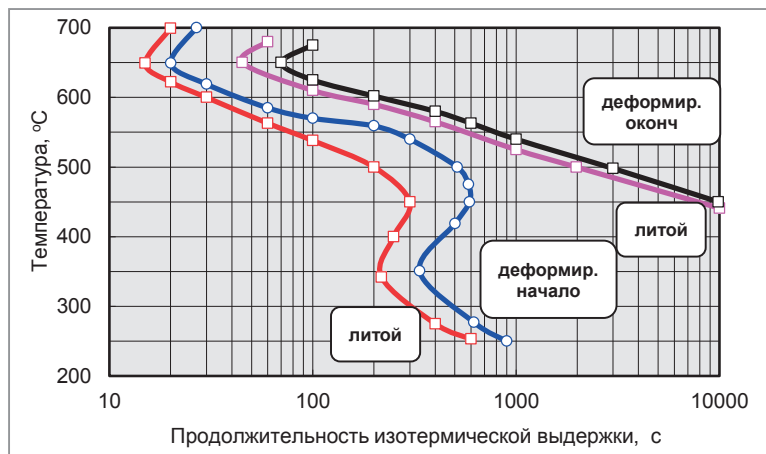


Рис. 9. Диаграмма изотермического распада одной из предложенных марок высокопрочного чугуна в литом состоянии (кривые слева) и после горячей пластической деформации (кривые справа)

При использовании горячей пластической деформации были откорректированы и оптимизированы температурно-временные параметры и условия аустенизации. В условиях экспериментов на Минском автомобильном заводе была показана эффективность замены варианта печного окислительного нагрева заготовок при аустенизации на нагрев в печах с защитной атмосферой [23] либо на скоростной индукционный нагрев в обычной атмосфере по определенной схеме: с паузами в нагреве и выдержками для выравнивания температуры по сечению заготовки.

Для определенных химических составов чугунов при варианте индукционного нагрева и относительной степени деформации около 80% удалось доказать возможность получения аусферритной структуры непосредственно после горячей пластической деформации. Такой вариант обработки в принципе полностью исключает использование сложной и дорогостоящей технологии изотермической закалки и применение экологически небезопасных соляных и селитровых ванн.

Выводы

1. Описана устойчивая мировая тенденция замены для ответственных машиностроительных изделий легированного стального проката на Austempered Ductile Iron (ADI) – высокопрочный чугун с шаровидным графитом, изотермически закаленный на аусферритную (бейнитную) структуру.
2. Обсуждены цены на основные легирующие элементы ADI-чугунов: молибден, никель и медь (суммарное количество которых в сплаве достигает 5%) и показано, что рост цен имеет стабильную положительную динамику.
3. С целью экономии основной «триады» легирующих элементов предложено снижение до минимума содержания наиболее дорогого элемента (молибдена) и ограничение суммарного содержания никеля и меди величиной 2% при обязательном использовании микролегирования ниобием и (или) бором, а также при дополнительном воздействии на отливку одним из способов высокоэнергетического воздействия – горячей пластической деформации (методы выдавливания, прессования, штамповки).
4. Показано, что обработка давлением наряду с приданием изделию необходимой формы оказывает существенное влияние на кинетику структурно-фазовых превращений. Установлено, что пластическая деформация действует аналогично легированию Mo и Ni, сдвигая С-образную кривую изотермического превращения аустенита вправо. Следовательно, аусферритную структуру можно получить при меньшей скорости охлаждения, а в некоторых случаях непосредственно после горячей пластической деформации, что существенно упрощает технологию.

5. В результате предложена концепция экономного легирования аусферритных (ADI) чугунов в комбинации с последующими обработкой давлением и изотермической закалкой. При этом нагрев отливки под аустенизацию совмещается с нагревом под пластическую деформацию, а использование дополнительной операции выдавливания (прессования) компенсируется пониженной стоимостью шихтовых материалов и сокращением продолжительности изотермической выдержки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Total Casting Tons Hits 112 Million // *Modern Casting*. December 2019. P. 22.
2. *Modern Casting*. December 2016. P. 25–29.
3. Patent US2485760. Cast ferrous alloy. Oct. 25, 1949. K. D. Millis et al. (заявлен 21.11.1947).
4. Global Casting Production Growth Stalls // *Modern Casting*. December 2017. P. 24–28.
5. **Горев, К. В.** Положение перитектического четырехугольника в системе Fe–C–Si / К. В. Горев, Л. А. Шевчук, Л. Р. Дудецкая, В. И. Гуринович // *Весті АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук.* 1971. № 1. С. 21–27.
6. **Горев, К. В.** Особенности насыщения γ -фазы в магниевом чугуне / К. В. Горев, Л. А. Шевчук // *Докл. АН БССР*. 1958. Т. 2. № 10. С. 450–452.
7. **Гораў, К. В.** Уплыў крэмнію і зыходнай структуры на працэс аустэнізацыі магневіага чыгуну / К. В. Гораў, Л. А. Шаўчук // *Весті АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук.* 1959. № 2. С. 44–48.
8. **Дудецкая, Л. Р.** Особенности бейнитного превращения в ковком чугуне / Л. Р. Дудецкая, В. А. Ткачева, А. И. Покровский // *Материалы, технологии, инструменты*. Гомель: Изд-во ИММС НАН Беларуси. 1998. Т. 3. № 2. С. 41.
9. **Дудецкая, Л. Р.** Бейнитный чугун: опыт получения и применения / Л. Р. Дудецкая, А. И. Покровский, И. С. Гаухштейн, М. И. Демин, П. С. Гурченко // *Автомобильная промышленность*. 2001. № 11. С. 33–35.
10. **Дудецкая, Л. Р.** Термообработка на бейнитную структуру деталей из чугуна / Л. Р. Дудецкая, А. И. Покровский, И. С. Гаухштейн, М. И. Демин, П. С. Гурченко // *Литье и металлургия*. 2002. № 1. С. 45–49.
11. **Покровский, А. И.** Использование высокопрочного бейнитного чугуна для изготовления зубчатых колес / А. И. Покровский, Л. Р. Дудецкая // *Литье и металлургия*. 2015. № 2 (79). С. 126–134.
12. **Покровский, А. И.** Бейнитный чугун или стальной прокат: границы возможностей при изготовлении ответственных изделий / А. И. Покровский, А. П. Ласковнев, Л. Р. Дудецкая // *Инженер-механик*. 2016. № 1 (70) январь-март. С. 9–21.
13. **Покровский, А. И.** Перспективы использования аустенито-бейнитного чугуна (ADI) в Беларуси / А. И. Покровский // *Инженер-механик*. 2016. № 4 (73). С. 16–29.
14. **Pokrovskii, Artur** Development and Application of Austempered Ductile Iron (ADI) in Belarus. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing GmbH, 2018. 63 p.
15. **Pokrovskii, A. I.** Effect of the shape of graphite inclusions on acoustic characteristics of articles from cast and deformed iron / A. I. Pokrovskii, A. S. Chaus, E. V. Kunovskii // *Metal Science and Heat Treatment (Springer)*. 2011. Vol. 53. № 7–8. P. 311–317.
16. Чугун: патент 4427 Респ. Беларусь, С1 ВУ МПК7 С22С37/00 / Л. Р. Дудецкая, А. И. Покровский, И. К. Данильчик; заявит. ФТИ НАН Беларуси. – № 970656; заявл. 27.11.1997; опубл. 30.06.2002 // *Афіц. бюлл. / НЦІУ*. 2002. № 2. С. 48.
17. Бейнитный чугун: патент (изобретение) 22823 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) С 22С 37/10 / А. И. Покровский; – № а 20180359; заявл. 24.07.2018; опубл. 30.12.2019. // *Афіц. бюлл. / НЦІУ*. 2019. № 6. С. 98.
18. Бейнитный чугун: патент (изобретение) 23331 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) С 22С 37/10 / А. И. Покровский – № а 20190368; заявл. 24.07.2018, опубл. 28.02.2021 // *Афіц. бюлл. / НЦІУ*. 2021. № 1. С. 57.
19. Аусферритный чугун: патент (изобретение) 23389 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) С 22С 37/10 / А. И. Покровский – № а 20200022; заявл. 27.01.2020, опубл. 30.04.2021 // *Афіц. бюлл. / НЦІУ*. 2021. № 2. С. 50.
20. Аусферритный чугун: патент (изобретение) 23393 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) С 22С 37/10 / А. И. Покровский; – № а 20200023; заявл. 27.01.2020, опубл. 30.04.2021 // *Афіц. бюлл. / НЦІУ*. 2021. № 2. С. 50.
21. **Горев, К. В.** Влияние ультразвука на структуру магниевого чугуна / К. В. Горев, Л. А. Шевчук // *Докл. АН БССР*. 1959. Т. 3, № 7. С. 298–299.
22. **Северденко В. П., Клубович В. В., Степаненко А. В.** Прокатка и волочение с ультразвуком. Минск: Наука и техника, 1970. 288 с.
23. Способ изготовления зубчатых колес из деформированного чугуна: патент (изобретение) 6552 Респ. Беларусь, С1 ВУ МПК7 В21К1/30, С21Д9/32 / Л. Р. Дудецкая, А. И. Покровский, И. С. Гаухштейн; заявит. ФТИ НАН Беларуси. № а 20000905; заявл. 03.10.2000; опубл. 30.09.2004 // *Афіц. бюлл. / НЦІУ*. – 2004. – № 3. – С. 120.

REFERENCES

1. Total Casting Tons Hits 112 Million. *Modern Casting*. December, 2019. 22 p.
2. *Modern Casting*. December, 2016, pp. 25–29.
3. Patent US2485760. Cast ferrous alloy. Oct. 25, 1949. K. D. Millis et al. (submitted 21.11.1947).
4. Global Casting Production Growth Stalls. *Modern Casting*. December, 2017, pp. 24–28.
5. **Gorev K. V., Shevchuk L. A., Dudeckaya L. R., Gurinovich V. I.** Polozhenie peritekticheskogo chetyryhugol'nika v sisteme Fe–C–Si [Position of peritectic quadrangle in system Fe–C–Si]. *Vesti AN BSSR. Ser. fizika-tehnichnyh navuk = Proc. Acad. Sci. BSSR, ser. Phys.-techn. Sci.*, 1971, no. 1, pp. 21–27.
6. **Gorev K. V., Shevchuk L. A.** Osobennosti nasyshcheniya γ -fazy v magnievom chugune [Specific features of saturation of γ -phase in magnesium cast iron]. *Doklady AN BSSR = Reports Acad. Sci. BSSR*, 1958, vol. 2, no. 10, pp. 450–452.
7. **Gorau K. V., Shauchuk L. A.** Uplyu kremniyu i zyhodnay struktury na pracess austenizatsiyi magnievaga chygunu [Effect of silicon and initial structure on the austenizing process of magnesium cast iron]. *Vesti AN BSSR. Ser. fizika-tehnichnyh navuk = Proc. Acad. Sci. BSSR, ser. Phys.-techn. Sci.*, 1959, no. 2, pp. 44–48.

8. **Dudetskaya L.R., Tkacheva V.A., Pokrovskiy A.I.** Osobennosti beynitnogo prevrashheniya v kovkom chugune [Specific features of bainitic transformation in malleable cast iron]. *Materialy, tehnologii, instrumenty = Materials, Technologies, Tools*, Gomel, IMMS NAN Btlarusi Publ., 1998, vol. 3, no. 2, pp. 41.
9. **Dudetskaya L.R., Pokrovskiy A.I., Gauhshteyn I.S., Demin M.I., Gurchenko P.S.** Beynitnyi chugun: opyt poluchenija i primeneniya [Bainitic cast iron: Experience in production and application]. *Avtomobilnaya promyshlennost = Automotive Industry*, 2001, no. 11, pp. 33–35.
10. **Dudetskaya L.R., Pokrovskiy A.I., Gauhshteyn I.S., Demin M.I., Gurchenko P.S.** Termoobrabotka na beynitnyuyu strukturu detaley iz chuguna [Heat treatment for bainitic structure of cast iron articles]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2002, no. 1, pp. 45–49.
11. **Pokrovskiy A.I., Dudetskaya L.R.** Ispol'zovanie vysokoprochnogo beynitnogo chuguna dlya izgotovleniya zubchatyh kolyos [Use of bainitic ductile iron for producing gear wheels]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2015, no. 2 (79), pp. 126–134.
12. **Pokrovskiy A.I., Laskovnev A.P., Dudetskaya L.R.** Beynitnyy chugun ili stal'noy prokat: granicy vozmozhnostey pri izgotovlenii otvetstvennykh izdeliy [Bainitic cast iron of rolled steel: Limits of possibilities in the manufacture of critical products]. *Inzhener-mehaniik = Mechanical Engineer*, 2016, no. 1 (70), pp 9–21.
13. **Pokrovskiy A.I.** Perspektivy ispol'zovaniya austenito-beynitnogo chuguna (ADI) v Belarusi [Prospects for the use of austenitic-bainitic cast iron (ADI) in Belarus]. *Inzhener-mehaniik = Mechanical Engineer*, 2016, no. 4 (73), pp. 16–29.
14. **Pokrovskii Artur.** Development and Application of Austempered Ductile Iron (ADI) in Belarus. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing GmbH, 2018, 63 pp.
15. **Pokrovskii A.I., Chau A.S., Kunovskii E.B.** Effect of the shape of graphite inclusions on acoustic characteristics of articles from cast and deformed iron. *Metal Science and Heat Treatment (Springer)*, 2011, Vol. 53, no. 7–8, pp. 311–317.
16. **Dudetskaya L.R., Pokrovsky A.I., Danil'chik I.K.** *Chugun* [Cast iron]. Patent of the Republic of Belarus, No. 4427, 2002.
17. **Pokrovsky A.I., Sen'ko S.F.** *Bejnitnyj chugun* [Bainitic cast iron]. Patent of the Republic of Belarus, No. 22823, 2002.
18. **Pokrovsky A.I.** *Bejnitnyj chugun* [Bainitic cast iron]. Patent of the Republic of Belarus, No. 23331, 2021.
19. **Pokrovsky A.I.** *Ausferritnyj chugun* [Ausferritic cast iron]. Patent of the Republic of Belarus, No. 23389, 2021.
20. **Pokrovsky A.I.** *Ausferritnyj chugun* [Ausferritic cast iron]. Patent of the Republic of Belarus, No. 23393, 2021.
21. **Gorev K.V., Shevchuk L.A.** Vliyanie ul'trazvuka na strukturu magnievogo chuguna [Effect of ultrasound on the structure of magnesium cast iron]. *Doklady AN BSSR = Reports Acad. Sci. BSSR*, 1959, vol. 3, no. 7, pp. 298–299.
22. **Severdenko V.P., Klubovich V.V., Stepanenko A.V.** *Prokatka i volochenie s ul'trazvukom* [Rolling and drawing with ultrasound]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1970, 288 p.
23. **Dudetskaya L.R., Pokrovsky A.I., Gauhshtein I.S.** *Sposob izgotovlenija zubchatyh koles iz deformirovannogo chuguna* [Method for manufacturing gear wheels from deformed cast iron]. Patent of the Republic of Belarus, No. 6552, 2004.