

УДК 669.131.2:669.046.516.4

Петроченко Е.В., Молочкова О.С., Трофимова Е.А.

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ КОМПЛЕКСНО-ЛЕГИРОВАННЫХ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ

**Аннотация.** Возрастающие требования к качеству, повышение механических и эксплуатационных свойств изделий в металлургии и машиностроении требуют разработки новых эффективных способов управления процессами структурообразования при получении изделий, так как именно структура материала определяет его свойства. Конкурентоспособность изделий из чугунов на рынке можно улучшить путем повышения механических и эксплуатационных характеристик. В настоящее время разработано большое количество технологических способов, обеспечивающих улучшение свойств железистоуглеродистых сплавов, в большинстве своем они направлены на совершенствование структуры материалов.

В статье рассмотрены различные методы воздействия: микролегирование, модифицирование, рафинирование и скорость кристаллизации на структурно-фазовый состав и специальные свойства комплексно-легированных белых чугунов. Кроме того, описана зависимость специальных свойств чугунов от структурно-фазового состава. Представлено влияние химических композиций на структуру и свойства белых чугунов. Описано совместное влияние хрома, марганца, никеля, и титана на специальные свойства чугунов, таких как жароизносостойкость и износостойкость. Приведено процентное содержание легирующих элементов в сплаве для наилучшего достижения специальных свойств. Приведены факторы, влияющие на жароизносостойкость и абразивную износостойкость комплексно-легированных белых чугунов.

Подтверждена актуальность применения бора в качестве микролегирующей и модифицирующей добавки для повышения свойств комплексно-легированных белых чугунов, выявлены концентрационные интервалы содержания бора и его влияние на структуру и свойства этих чугунов. Дополнительная обработка базового чугуна бором существенно улучшает износостойкость и повышает твердость металла. Микролегирование чугуна бором повышает его технологические и эксплуатационные свойства.

**Ключевые слова:** микролегирование, модифицирование, рафинирование, кристаллизация, структура, износостойкость, комплексно-легированный белый чугун, белый жароизносостойкий чугун, окалиностойкость, ростоустойчивость

Комплексно-легированные белые чугуны используются для изделий, работающих в условиях повышенного износа и высоких температур. Они обладают высокими механическими свойствами в сочетании со стойкостью к окислению при повышенных температурах и абразивному износу. Композиционное и дисперсионное упрочнение чугуна, которое гарантирует данные свойства, достигается благодаря стабильной микроструктуре, которая состоит из вязкой металлической основы и высокотвердых первичных, эвтектических и вторичных карбидов.

Жаростойкость чугуна оценивается по двум свойствам: стойкости к образованию окалины и ростоустойчивости. Такие свойства чугуна зависят от следующих факторов: рабочей среды отливки, температуры нагрева во время работы, вида нагрева (непрерывный или периодический), скорости нагрева и охлаждения. Также на жаростойкие свойства отливок влияет характер металлической основы (металлической массы) – ее окисляемость, степень однородности, склонность к образованию внутренних напряжений, плотность и газонасыщенность. Оценка стойкости легированного чугуна к высокотемпературной газовой коррозии сводится к определению толщины защитного слоя, образующегося на поверхности металла в результате реакции металла с компонентами агрессивной среды [1, с. 176-177].

При циклических механических и термических нагрузках долговечность отливок нельзя оценивать только по окалиностойкости и ростоустойчивости, так как не только эти показатели определяют срок службы

отливок. Температурные колебания изменяют объемные размеры отливок, а окислительные процессы постепенно влияют на прочностные свойства чугуна. Долговечность отливок, устойчивых к образованию окалины, связана с жаростойкими характеристиками чугуна [1].

Условия эксплуатации оборудования в горнодобывающей, перерабатывающей и металлургической промышленности характеризуются высокими рабочими температурами и износом. Потеря массы в процессе эксплуатации и окисление – первостепенные причины выхода из строя таких изделий. Сложногеометрические узлы и детали традиционно производятся из белых чугунов, что обусловлено не только экономической целесообразностью, но и, как правило, единственно возможным способом, включающим в себя заливку в формы. Специзделия, которые работают в сложных условиях, должны обладать повышенными особыми характеристиками, и не менее важными высокими механическими и технологическими свойствами. Испытания показали, что углеродистые стали и серые чугуны менее износостойки, чем белые чугуны [2, с. 26-27].

Износ, вызванный сложными механическими, теплофизическими и химическими процессами на поверхностях деталей, находящихся в контакте друг с другом или с внешней средой, является одной из основных причин выхода данных деталей из строя при нормальных и повышенных температурах. Интенсивность этих процессов в значительной степени зависит от структуры поверхности и условий эксплуатации изделий. При этом оба фактора взаимозависимы, то есть

определенная оптимальная структура соответствует конкретным условиям эксплуатации [3, с. 4].

От количества и типа карбидной фазы легированных белых чугунов зависят механические свойства и их износостойкость. Высокая износостойкость белых чугунов в основном обусловлена повышенным содержанием первичных карбидов MC и эвтектических карбидов, таких как  $(Fe, Cr)_7C_3$ , в преимущественно аустенитной или мартенситной матрице [4, 5]. Параметры карбидной фазы, а именно ее размер, объемная доля и форма, существенно влияют на износостойкость чугунов. Также прочное соединение карбидов с металлической основой сплава значительно повышает износостойкость. При одинаковом количестве карбидов чугун с пластинчатой и скелетообразной формой карбидов менее износостойкий, чем сплав с шаровидными карбидами. Матрица износостойкой отливки должна быть достаточно прочной, чтобы хорошо сопротивляться истиранию, и достаточно вязкой, чтобы предотвратить выпадение карбидов. Наиболее благоприятна в этом отношении аустенитно-мартенситная матрица, так как мартенсит хорошо сопротивляется износу, а аустенит препятствует выпадению карбидов. Чугуны обладают высокой износостойкостью при условии, что чугуны имеют однотипные карбиды и их металлическая основа однородна [2, 5, 6].

Количество карбидной фазы в белом чугуне определяется в первую очередь содержанием углерода, а затем типом и количеством карбидообразующих элементов. Также важно влияние легирующего элемента на количество (объемную долю), тип, дисперсность, морфологию и структуру образующихся эвтектик. Карбиды являются важной фазой в чугунах, их объемная доля может достигать 40% [2, 5-9]. Высокая доля карбидных фаз приводит к повышению твердости и, в то же время к хрупкости сплава вследствие снижения пластичности. Карбиды с большим размером отслаиваются от матрицы сплава в процессе эксплуатации, что снижает износостойкость.

Основными технологическими методами улучшения специальных свойств, влияющих на свойства комплексно-легированного чугуна, являются:

- соблюдение температурного режима при плавке и разливке металла в формы, а также контроль кристаллизации сплава;
- рафинирование и раскисление;
- модифицирование и микролегирование;
- термическая обработка, как наиболее эффективный инструмент управления процессами получения требуемых структур металлических матриц.

Режим и характер кристаллизации комплексно-легированных белых чугунов оказывают существенное влияние на их структурно-фазовое состояние. Морфология первичного аустенита напрямую связана с режимом затвердевания чугуна. В чугуне, затвердевающему по эндогенному режиму (кристаллы зарождаются и растут внутри сплава), затвердевшая структура показывает второй тип дендритной морфологии (равноос-

ные дендриты). В белом чугуне влияние морфологии аустенита на прочность сплава более важно, в то время как в сером чугуне большую роль играет количество дендритов. Скорость охлаждения расплава во время кристаллизации является наиболее важным фактором, влияющим на морфологию и количество первичных карбидов, дендритов аустенита и эвтектики. Увеличение скорости охлаждения во время кристаллизации и применение направленной кристаллизации изменяют характеристики структуры, такие как размер и взаимное расположение структурных составляющих [10]. Таким образом, варьируя условия охлаждения, можно управлять структурным состоянием и специальными свойствами чугунов.

Процессы структурообразования чугунов можно разделить на две фазы: формирование первичной микроструктуры, которое происходит при кристаллизации чугуна, и формирование вторичной микроструктуры, связанное с превращением аустенита при охлаждении из литого состояния или при термической обработке.

Кристаллизация в чугуне может развиваться следующими путями: 1) в два этапа с образованием первичных фаз (избыточных карбидов и дендритов твердого раствора) и последующей эвтектической кристаллизацией; 2) в один этап, когда химический состав чугуна близок к эвтектическому или, в случае переохлаждения, соответствует квазиэвтектическому. В целом направление развития процессов кристаллизации зависит от химического состава сплава, скорости охлаждения, модифицирования и микролегирования. При кристаллизации комплексно-легированных белых чугунов путем воздействия металлургических факторов изменяется тип, форма, размеры избыточных карбидов и эвтектик, которые наряду с металлической матрицей определяют свойства чугунов [11].

Одним из эффективных методов улучшения механических и специальных свойств чугунов является рафинирование. Данный метод позволяет получать сплавы наилучшего качества за счет снижения содержания вредных примесей и газов до минимума. Сочетание рафинирования и модифицирования активно влияет на степень чистоты сплава, размер зерна, состав и морфологию избыточных фаз, что сказывается на всем спектре свойств [12].

Особое значение имеет вопрос об оптимальном легировании белых чугунов, которое должно обеспечивать наиболее благоприятную структуру и совокупность требуемых свойств. В этом случае внимание уделяется изучению взаимосвязи «состав – структура – свойства» [13].

При эксплуатации белых чугунов при повышенной рабочей температуре велика вероятность деградации структуры, то есть изменения структурно-фазового состава [14-17]. Чтобы избежать этого явления, белый чугун легируют такими элементами, как Cr, Mn, Ni и Ti [18].

При легировании чугуна хромом резко повышается жаростойкость, что связано с образованием на по-

верхности прочной и тугоплавкой пленки оксида хрома. Влияние никеля и марганца проявляется в общем улучшении структуры отливок, формировании стабильной аустенитной структуры металлической матрицы. Модифицирование титаном обеспечивает чугуны требуемые жаростойкость и жаропрочность за счет стабилизирующего воздействия. При содержании хрома в оксидном слое более 30% образуется непрерывный плотный оксидный слой с хорошей адгезией к основному металлу, который препятствует дальнейшему окислению сплава [19, 20].

Хром в количестве 15-20% необходим для образования в структуре белого чугуна первичных карбидов тригонального типа  $M_7C_3$ , что обеспечивает высокую износостойкость и жаростойкость отливок. При содержании хрома менее 15% в структуре чугуна образуются наряду с карбидами  $M_7C_3$  карбиды типа  $M_3C$ , снижается содержание хрома в металлической основе, образуются продукты распада аустенита, что снижает жаростойкость и износостойкость чугуна. При содержании хрома, превышающим 20%, в структуре чугуна появляются крупные первичные карбиды, что приводит к обеднению металлической основы хромом, снижению жаростойких и износостойких свойств [21]. При кристаллизации аустенитной хромистокарбидной эвтектики карбиды  $(Cr,Fe)_7C_3$  в отличие от ледебурита с карбидами типа  $M_3C$  не образуют непрерывную фазу, а располагаются в виде изолированных тригональных карбидов в аустенитной основе. Карбиды  $(Cr,Fe)_7C_3$  более твердые и более дисперсные, что придает чугуны высокую износостойкость и прочность. Микротвердость карбидов  $(Cr,Fe)_7C_3$  составляет 12000-15000 МПа, значительно превышая микротвердость кварца (10000 МПа) - наиболее часто используемого абразива, в то время как твердость карбидов цементита  $Fe_3C$  или  $(Fe,Cr)_3C$  близка к микротвердости кварца и составляет 8000-11000 МПа. Это объясняет высокую износостойкость высокохромистого чугуна в условиях эксплуатации [2].

Углерод в белых чугунах обычно содержится в диапазоне 1,7-3,6%. Содержание углерода 1,7-2,5% в чугунах позволяет образовываться карбидам типа  $M_7C_3$ , которые способствуют повышенной износостойкости чугуна. При введении в чугун углерода в количестве менее 1,7% объемная доля карбидов уменьшается, снижая износостойкость, а при содержании более 2,5% металлическая основа обедняется хромом, что отрицательно сказывается на жаростойкости чугуна. Увеличение содержания углерода (выше 3,6%) приводит к образованию крупных заэвтектических карбидов в структуре чугуна, что также приводит к снижению износостойкости [22].

Значительное повышение окалиностойкости и ростоустойчивости может быть достигнуто комплексным легированием чугуна хромом и никелем. Никель как аустенитообразующий элемент увеличивает растворимость углерода (карбидов хрома) в аустените, что приводит к увеличению содержания хрома в твердом

растворе и повышает окалиностойкость сплава [22]. Никель в количестве 1,0 - 2,0% в сочетании с марганцем способствует образованию стабильной однофазной аустенитной структуры металлической основы и повышает жаростойкость чугуна [23].

Легирование чугуна марганцем в количестве 3,5-5,0% приводит к образованию стабильной аустенитной структуры металлической основы. Увеличение содержания марганца более 5,0% приводит к обеднению металлической основы чугуна углеродом и хромом, что снижает жаростойкость и износостойкость. При содержании марганца менее 3,5% стабильность аустенита снижается [5].

Титан в количестве 0,2-0,6% устраняет столбчатое строение отливок, способствует измельчению дендритов аустенита и эвтектических колоний, модифицирует чугун, что позволяет получать однородные механические свойства по толщине отливок, стабилизирует структуру. Известно, что во время кристаллизации сплавов на основе железа, содержащих титан, он выделяется, прежде всего, в виде карбидов или карбонитридов. Титан имеет особенность переохлаждать расплавленный чугун, что способствует образованию карбидов титана. При содержании титана менее 0,2% стабилизирующее влияние будет незначительное, так как невелико количество карбидов титана (TiC). При содержании титана свыше 0,6% в чугуне образуются пленочные включения оксидов титана больших размеров, которые располагаются по границам аустенитных зерен, что снижает износостойкость чугуна [24, с. 42-66, 25-28].

Модифицирование чугуна, наряду с легированием, является одним из методов получения высококачественных отливок со специальными свойствами. Модифицирование повышает твердость, износостойкость и жаростойкость отливок, в основном за счет измельчения структуры и устранения трансформации [29].

Согласно работе П.А. Ребиндера, модификаторы, а именно примеси, вводимые в расплав, оказывают двойное действие. Модификаторы первой группы образуют в расплаве высокодисперсную взвесь отдельных частиц, которые становятся центрами кристаллизации [30]. Модификаторы второй группы адсорбируются на гранях зарождающихся кристаллов и препятствуют их росту. При этом введение избыточного количества добавки может привести к укрупнению зерна, наступающему в результате эффекта перемодифицирования [31, с. 14-17].

Известно, что дополнительная обработка чугуна бором значительно улучшает износостойкость и повышает твердость металла. Как поверхностно-активный элемент, бор оказывает сильное влияние на процессы кристаллизации чугуна, измельчает зерно и осуществляет дополнительное раскисление металла. Поскольку бор, адсорбируясь на поверхности растущих кристаллов, снижает тепловыделение при кристаллизации, происходит увеличение переохлаждения.

Это способствует увеличению дисперсности эвтектик (межкарбидному расстоянию в них). Бор также изменяет состояние границ зерен и пограничных слоев, что положительно влияет на свойства чугуна. На основании этих изменений бор относится к модификаторам второго рода. Микролегирование чугуна бором улучшает его технологические и эксплуатационные свойства при одновременном снижении содержания в чугуне хрома, марганца, никеля и других элементов. Однако исследования показали, что при обработке чугуна бором необходимо соблюдать осторожность, поскольку уже при присадке 0,03% бора чугун приобретает хрупкий излом при комнатной температуре, а его износостойкость практически остается без изменений. Для повышения эксплуатационных характеристик белых чугунов их целесообразно модифицировать бором в пределах 0,005–0,02% [24].

Применение легирования, микролегирования, модифицирования и рафинирования позволяет продлить срок службы деталей, изготовленных из белых чугунов и повысить долговечность оборудования металлургического, горнодобывающего и обогащительного, коксохимического производств, работающего в условиях повышенных температур и абразивного износа.

По результатам проведенного литературного обзора в российской и зарубежной литературе была подтверждена актуальность темы о возможности применении бора в качестве микролегирующей и модифицирующей добавки для повышения свойств комплексно легированных белых чугунов, а также выявлены концентрационные интервалы содержания бора и его влияние на структуру и свойства этих чугунов. Бор способствует устранению столбчатого строения кристаллов твердого раствора и диспергированию карбидной фазы, увеличению микротвердости структурных составляющих, упрочнению металлической матрицы, увеличению износостойкости при содержании его в чугуне не менее 0,005% и не более 0,03%.

#### Список источников

1. Бобро Ю.Г. Легированные чугуны. М.: Металлургия, 1976. 288 с.
2. Гарбер М.Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация. М.: Машиностроение, 2010. 280 с.
3. Жуков А.А., Сильман Г.И., Фрольцов М.С. Износостойкие отливки из комплексно-легированных белых чугунов. Москва, 1984. 103 с.
4. Сильман Г.И. Белые легированные чугуны с композиционной структурой // Металловедение и термическая обработка металлов. 2005. № 7 (601). С. 94-100.
5. Шейнман Е.Л. Абразивный износ. Обзор американской печати // Трение и износ. 2005. Т. 26. № 1. С. 100-111.
6. Цыпин И. И. Белые износостойкие чугуны: структура и свойства. М.: Металлургия, 1983. 176 с.
7. Войнов Б.А. Износостойкие сплавы и покрытия. М.: Машиностроение, 1980.
8. Артеменко Ю.А., Рьжков Е.В., Болотин Н.С. Вопросы регулирования микроструктуры износостойких наплавленных сплавов // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2012. №15. С. 6-8.
9. Влияние структуры на износостойкость белых чугунов / М.Е. Гарбер [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 1968. № 11. С. 48–52.
10. Повышение износостойкости хромистых чугунов. / В.М. Ильюшенко, П.Ю. Дувалов, К.Э. Барановский, И.Б. Проворова, Е.В. Розенберг // Литье и металлургия. 2016. № 2 (83). С. 5-9.
11. Макаренко К.В. Рациональное структурирование графитизированных чугунов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 2 (104). С. 196-205.
12. Колокольцев В.М., Шевченко А.В. Повышение свойств отливок из чугуна специального назначения путем рафинирования и модифицирования их расплавов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 1 (33). С. 23-29.
13. Колокольцев В.М., Конопка З., Петроченко Е.В. Структура и свойства белых чугунов разных систем легирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 19-23.
14. Sain P.K., Sharma C.P., Bhargava A.K. Microstructure aspects of a newly developed, low cost, corrosion-resistant white cast iron, J. Metall. Mater. Trans. A, 2013, vol. 44, pp. 1665-1671.
15. Yoganandh J., Natarjan, S., and Kumaresh Babu S.P. Erosive wear behavior of nickel-based high alloy white cast iron under mining conditions using orthogonal assay, J. Mater. Eng. Perform., 2013, vol. 22, no. 9, pp. 2534-2540.
16. Bedolla-Jacuinde A., Arias L., and Hernández B. Kinetics of secondary carbides precipitation in a high-chromium white iron, J. Mater. Eng. Perform., 2003, vol. 12, no. 4, pp. 371-382.
17. Janus A. Effect of chemical composition on number of eutectic colonies in Ni–Mn–Cu cast iron, Arch. Foundry Eng., 2013, vol. 13, no. 1, pp. 51-56.
18. Тен Э.Б., Рожкова Е.В., Конюхова А.И. Термодинамические предпосылки легирующего эффекта при модифицировании низкохромистого чугуна // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2013. № 11. С. 51-54.
19. Гарбер М.Е., Цыпин И.И. Основы подбора составов и структуры износостойких отливок из белого чугуна // Литейное производство. 1970. № 2. С. 2–6.
20. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Воронков Б.В. Особенности формирования структуры белых чугунов и их классификация // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 1 (17). С. 97-105.

21. Структурно- и неструктурно-чувствительные свойства хромистых чугунов / А. А. Кириллов, В. Д. Белов, Е. В. Рожкова и др. // Черные металлы. 2007. № 9. С. 7-13.
22. Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Анализ взаимосвязи химического состава, условий охлаждения при затвердевании с особенностями строения сплавов, окисленной поверхности и свойствами комплексно-легированных белых чугунов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 4 (36). С. 50-53.
23. Нетребко В.В. Особенности образования карбидов и распределения Cr, Mn и Ni в белых чугунах // Литье и металлургия. 2015. № 3 (80). С. 40-46.
24. Жуков А.А., Сильман Г.И., Фрольцов М.С. Износостойкие отливки из комплексно-легированных белых чугунов. М.: Машиностроение, 1984. 104 с.
25. Служебные характеристики микролегированных и модифицированных белых чугунов / М.М, Яшминский, К.С. Радченко, Г.Е. Федоров, Е.А. Платонов // Литье и металлургия. 2013. №4. С. 29-34.
26. Емелюшин А.Н. Влияние титана и бора на износостойкость чугуна, предназначенного для механической обработки неметаллических материалов инструмента из хромистых чугунов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2000. № 2. С. 28-29.
27. Васенко Ю.А. Моделирование износостойкости чугуна, легированного титаном, по данным пассивного эксперимента // Технологический аудит и резервы производства. №2(2). 2011. С. 3-8.
28. Jumaev A. A. Comparative study of the structure of castings from white wear resistant cast iron // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2018. 12. P.7575-7577.
29. Повышение жаростойкости хромистого чугуна ЧХ8 / Тен Э.Б., Левин М.И., Рожкова Е.В., Конюхова А.И. // Литейщик России. 2015. № 2. С. 35-38.
30. Петроченко Е.В., Молочкова О.С., Трофимова Е.А. Состояние вопроса модифицирования, микролегирования и рафинирования белых чугунов // Технологии металлургии, машиностроения и материалов обработки. 2020. № 19. С. 152-159.
31. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Инокулирование железоуглеродистых сплавов. М.: Металлургия, 1993. 416 с.

**Сведения об авторах**

**Петроченко Елена Васильевна** – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [evp3738@mail.ru](mailto:evp3738@mail.ru)

**Молочкова Ольга Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [opetrochenko@mail.ru](mailto:opetrochenko@mail.ru)

**Трофимова Евгения Александровна** – аспирантка, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [e\\_troff@mail.ru](mailto:e_troff@mail.ru)

*INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH*

**WAYS TO INCREASE THE SPECIAL PROPERTIES OF COMPLEX-ALLOYED WHITE CAST IRON**

**Petrochenko Elena V.** – doctor of technical sciences, professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [evp3738@mail.ru](mailto:evp3738@mail.ru)

**Molochkova Olga S.** – candidate of technical sciences, associate professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [opetrochenko@mail.ru](mailto:opetrochenko@mail.ru)

**Trofimova Evgeniya A.** – postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [e\\_troff@mail.ru](mailto:e_troff@mail.ru)

**Abstract.** Increasing quality requirements, improving the mechanical and operational properties of products in metallurgy and mechanical engineering require the development of new effective ways to control the processes of structure formation in the manufacture of products, since it is structure of the material that determines its properties. The competitiveness of cast iron products in the market can be increased by improving the mechanical and performance characteristics. At present, a large number of technological methods have been developed to improve the properties of iron-carbon alloys, most of them are aimed at upgrading the structure of materials.

The article discusses various methods of influence: microalloying, modification, refining and crystallization rate on the structural-phase composition and special properties of complex-alloyed white cast irons. In addition, the dependence of the special properties of cast irons on the structural-phase composition is described. The influence of chemical compositions on the structure and properties of white cast irons is presented. The joint influence of chromium, manga-

nese, nickel, and titanium on the special properties of cast irons, such as heat resistance and wear resistance, is described. The percentage of alloying elements in the alloy is given to best achieve special properties. The factors influencing the heat-wear resistance and abrasive wear resistance of complex-alloyed white cast irons are given.

The relevance of the use of boron as a microalloying and modifying additive to improve the properties of complex-alloyed white cast irons has been confirmed, the concentration ranges of boron content and its effect on the structure and properties of these cast irons have been identified. Additional processing of base cast iron with boron significantly improves wear resistance and increases the hardness of the metal. Microalloying of cast iron with boron improves its technological and operational properties

**Keywords:** microalloying, modification, refining, crystallization, structure, wear resistance, complex-alloyed white cast iron, white heat-resistant cast iron, scale resistance, growth resistance

---

Ссылка на статью:

Петроченко Е.В., Молочкова О.С., Трофимова Е.А. Пути повышения специальных свойств комплексно-легированных белых чугунов // Теория и технология металлургического производства. 2023. №1(44). С. 24-29.  
Petrochenko E.V., Molochkova O.S., Trofimova E.A. Ways to increase the special properties of complex-alloyed white cast iron. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 44, no. 1, pp. 24-29.