

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i1.03>

## Trends in improving the properties of wear-resistant chromium cast irons

A.M. Uskenbayeva\*, A.V. Panichkin, A.A. Mamaeva, A.K. Kenzhegulov, B.B. Kshibekova

Satbayev University, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan

\*Corresponding author: [almauskenbaeva@mail.ru](mailto:almauskenbaeva@mail.ru)

**Abstract.** The article discusses various types of methods for increasing the wear resistance and performance characteristics of wear-resistant chromium cast irons associated with the processes of influencing the structure of the crystallizing metal by out-of-furnace treatment of the melt with micro-ligating and modifying elements. Requirements are presented for the quality of these castings in terms of operational and service characteristics, which makes it necessary to improve their composition and production technology, since when operating wear-resistant chromium cast iron parts of machines operating under friction conditions, the main reason for their failure is wear. The analysis of works to improve the methods of refining and modification of wear-resistant chromium cast iron is carried out. The need for further work to improve the methods of obtaining wear-resistant chromium cast irons is shown. The work is aimed at finding technologies for controlling the processes of forming the necessary microstructure of alloys through the choice of the optimal composition, refining, modification, the rate of crystallization of the cast structure. It was revealed that to ensure the quality of the product, it is necessary to structurally control melts of chromium wear-resistant cast iron, which can be carried out by optimizing alloying, modifying, and developing rational technological processes. And this requires research on the selection and calculation of alloying and modifying elements, as well as optimization of the pouring temperature.

**Keywords:** cast iron, chromium, wear-resistant, carbides, microstructure.

### 1. Введение

Основной причиной выхода из строя деталей машин и механизмов, используемых для транспортировки, загрузки, измельчения и истирания сырья и продуктов, перерабатываемых и получаемых в горно-металлургической, угольной отраслях является абразивный износ. Это, учитывая колоссальные объемы перерабатываемого сырья в мире, делает важным повышение эксплуатационных характеристик таких деталей, что в первую очередь может быть достигнуто путем изготовления их из материалов с более высокой износостойкостью для конкретных условий эксплуатации.

В условиях абразивного износа, хорошо зарекомендовали себя износостойкие хромистые чугуны. Современные износостойкие чугуны являются, как правило, высокоуглеродистыми сложнолегированными многокомпонентными сплавами. Наиболее распространенными системами легирования являются системы: Fe-Cr, Fe-Cr-Mo, Fe-Cr-Mn, Fe-Cr-Ni, Fe-Cr-W-V и др. [1].

К качеству этих отливок предъявляются требования по эксплуатационным и служебным характеристикам, что делает необходимым совершенствование их состава и технологии производства. В производстве износостойких хромистых чугунов существуют проблемы – это не высокие механические свойства, склонность к образованию трещин в отливках в процессе кристаллизации и термической обработки, высокие линейная и объемная усадки, сложность механической обработки и др. Реше-

ние проблем получения качественных отливок связано с получением их оптимальных структур, обеспечивающих повышенные механические и эксплуатационные свойства. В зависимости от этого повышаются сроки службы оборудования, машин и механизмов.

Для получения оптимальных структур необходимо управлять процессами формирования структуры и свойств металла в отливках определяя соотношение в них основных химических элементов, иначе говоря, проводить оптимальное легирование, модифицирование, изменять условия кристаллизации металла в отливках, а также проводить термическую обработку при оптимальных режимах [1]. Не смотря на множество работ по повышению качеств отливок из чугунов, до сих пор являются актуальными исследования по изучению влияния легирующих и модифицирующих элементов, а также условий охлаждения на процессы кристаллизации, структурообразования, механические и эксплуатационные свойства отливок.

### 2. Основная часть

Во многих исследованиях ученых [2-13] описывается, что для получения чугунов с повышенными функциональными свойствами необходимо провести комплекс мероприятий. Это, прежде всего, подготовка шихтовых материалов для качественного расплава, выбор и обработка его рафинирующе-модифицирующими материалами, условия охлаждения при затвердевании, термовре-

менная обработка расплава и возможная последующая термическая обработка.

В износостойких хромистых чугунах эксплуатационные и механические свойства определяются, прежде всего, карбидной фазой. Именно карбидная фаза определяет специфические свойства износостойких чугунов и, в то же время, создает значительные трудности при производстве и эксплуатации этих сплавов [14].

Количество и форма карбидов, а также структура продуктов превращения аустенита влияют на эксплуатационные характеристики отливок. Большое количество твердых и хрупких карбидных фаз различающиеся по размеру и равномерности распределения определяет низкие пластические свойства чугунов, однако при условии прочной связи их с матрицей сплава такие фазы значительно повышают сопротивление металлоабразивному воздействию [14].

Наличие в структуре первичных карбидов оказывает отрицательное влияние на свойства износостойких хромистых чугунов. В работах [10,15-19] показано, что источником заэвтектических карбидов в хромистых чугунах является феррохром, который добавляют при выплавке. Крупные карбиды хрома не успевают полностью раствориться в процессе плавки чугуна и остаются в структуре после затвердевания сплава. При исследовании влияния разных марок феррохрома на структуру и свойства чугуна рекомендуется использование низкоуглеродистых марок феррохрома. Свойства такого чугуна оказались выше по сравнению с чугуном, выплавленным на феррохроме с более высоким содержанием углерода.

В работе [15] исследовались сплавы, содержащие углерод от 2% до 3.0% и хром от 12 до 24%, было выявлено, что структура литых чугунов состоит из переохлажденного аустенита, продуктов его распада и первичной карбидной фазы. Показано, что с увеличением содержания углерода первичные выделения укрупняются. При повышении содержания хрома наблюдается дробление карбидной сетки, карбиды обособливаются и увеличиваются их размеры. Количество эвтектики уменьшается.

Вместе с тем в работе [1] описано, что с увеличением твердости карбидов износостойкость чугунов растет, и максимальное ее значение соответствует содержанию 12-24%Cr при 3%С, при этом чугун содержит карбиды  $(Cr,Fe)_7C_3$  с 1200-1500 HV. При увеличении количества карбидов по мере роста содержания углерода износостойкость возрастает линейно до появления в структуре хрупких заэвтектических карбидов.

В промышленных высокохромистых марках чугунов обычное содержание хрома находится в диапазоне от 12 до 22%, а в некоторых случаях и выше. Хром значительно повышает энергию связи в аустените и существенно замедляет диффузию углерода [20-22]. Поэтому при увеличении содержания хрома в сплавах выделение дисперсных карбидов  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  и последующая перекристаллизация части аустенита в феррито-карбидную смесь замедляется.

В зависимости от содержания или соотношения хрома и углерода соответственно меняются свойства чугунов. В работе [23] изучены износ- и коррозионностойкость высокохромистых сплавов белого чугуна, где было обнаружено, что абразивная износостойкость сплавов зависит от отношения Cr/C и отношения содержания хрома в карбиде  $Me_7C_3$  к содержанию хрома в матрице

$((CrMe)_7C_3/Matrix)$ . Показано, что сплав с более низким отношением Cr/C дает низкие потери при абразивном износе, в то время как сплав с более высоким соотношением Cr/C показывает самые высокие потери при износе, но при этом оказался наиболее устойчивым к коррозии.

Легирующие элементы, наиболее сильно повышающие сопротивление деформированию, оказывают значительное влияние на износостойкость. Упрочнение твердых растворов в основном происходит от искажения решетки, создаваемое растворенным элементом. Особенно сильное влияние малых количеств легирующего элемента объясняется тем, что он в большей степени изменяет состав и строение границ, нежели самих зерен [24].

Например, повышение износостойкости и твердости за счет легирования рассмотрено в работах [25,26] где выявлено, что при дополнительном легировании различными элементами (Mo, W, V, Mn) увеличиваются твердость и износостойкость хромистого чугуна в литом состоянии. Последующая возможная термическая обработка повышает эти свойства в зависимости от степени легирования.

В работе [14] описано также, что для увеличения твердости и износостойкости отбеленных чугунов применяют низкое и среднее легирование их Ni, Cr, Mn, Mo, V, B, Ti и др. Такое легирование приводит к уменьшению количества и размеров графитовых включений, увеличению дисперсности продуктов превращения аустенита и, вследствие этого, к повышению твердости и износостойкости чугуна.

В различных работах [4,8,10,11,27,31-30] показано, что наибольшего повышения функциональных свойств литых изделий можно добиться путем комплексного модифицирования расплава активными элементами. Причем, они должны иметь различный механизм воздействия на расплав, т.е. должны быть инокуляторами, ингибиторами и инверсорами.

Модифицирование остается сегодня наиболее универсальным способом уменьшения химической и структурной неоднородности, а также управления кристаллическим строением литого металла.

Модифицирование в чугунах рассматривается и как средство преобразования углерода [31]. В более широком плане конечными целями модифицирования являются регулирование размеров, формы и ориентировки структурных составляющих.

Особое внимание привлекают исследования в области структурообразования и изменения свойств чугунов при введении наномодифицирующих добавок. В качестве эффективных нанодобавок повышенный интерес вызывают углеродные наноструктуры, вследствие уникальности их свойств и соответствующей возможности эффективного использования на практике. В работе [32] описано, что нанодобавки в виде углеродных наноструктур воздействуют на процессы зародышеобразования через активацию углеродных структур в чугуне, вовлекая их в процессы модифицирования, то есть зародышеобразования и одновременно адсорбции их на поверхности появляющихся центров кристаллизации. Адсорбция позволяет сохранить центры, тормозя их растворение и препятствуя росту до сверхкритического размера. Такие нанодобавки влияют не только на углеродные

структуры чугуна, активизируя их для образования углеродной фазы, но и на другие модифицирующие компоненты (Si, Ca, Ba, Al) основного модификатора, способствуя созданию дополнительных гетерогенных центров. В результате такого модифицирования повышается прочность и износостойкость чугуна. [32-33].

На сегодняшний день существуют более десятка теорий модифицирования чугунов и более тысяч видов модификаторов различного состава.

В промышленности в качестве модифицирующих добавок нашли применение РЗМ, а также комплексные модификаторы с использованием РЗМ. Особенности атомного строения РЗМ и физико-механические свойства предоставляют перспективность использования их в износостойких чугунах в качестве рафинирующих, модифицирующих и легирующих элементов. Взаимодействие РЗМ с газами, серой и другими примесями дает положительное влияние на дисперсность, форму и распределение неметаллических включений в сплавах. Неметаллические включения измельчаются, сфероидизируются и располагаются внутри зерен, а иногда и уменьшается их количество [34]. Близость химических свойств всех РЗМ обусловила их подобное влияние как технологических добавок.

Комплексные модификаторы содержат несколько элементов. В их состав, могут входить магний, кремний, литий, алюминий, кальций, марганец, бериллий, церий, иттрий и другие редкоземельные металлы (РЗМ) [35]. Сочетание комплексных модификаторов усиливает эффект от действия модификатора и создает возможность получения особо мелких и специальных структур. Влияние разных комплексных модификаторов различное и зависит от конечной цели.

В хромистых чугунах комплексные модификаторы способствуют равномерному распределению карбидов и их размерности тем самым повышая эксплуатационные свойства. В работе [36] описано влияние хрома, вместе с комплексным модификатором на распределение карбидов в структуре и свойства белого чугуна. Показано, что низкое содержание хрома образует сетчатую структуру карбидов  $(Fe, Cr)_3C$  или  $(Fe, Cr)_3C+(Cr, Fe)_7C_3$ . Увеличение хрома приводит к формированию карбидов  $(Cr, Fe)_7C_3$ , а при воздействии комплексным модификатором появляются равномерно распределенные, изолированные и децентрализованные карбиды с повышенной твердостью.

Вместе с тем в высокохромистых чугунах очистка расплава от плен, неметаллических включений, газов является насущной задачей для получения качественных деталей. В работе [37] показана технология получения отливок лопастей дробеметных аппаратов, где исследовалось влияние различных раскислителей (Ti, Al, СИМИШ-1, ЖКМК-6, ФЦМ-6) на качество и свойства отливок из высокохромистого чугуна. Выявлено, что для ускорения процесса формирования тригонального карбида и повышения эксплуатационных свойств, хромистых чугунов необходимо модифицирование их комплексными модификаторами, не содержащими кремния, утверждают авторы.

Как видим, модификаторы оказывают существенное влияние, на процесс кристаллизации, участвуя в росте центров кристаллизации образуя химические соединения или разлагая их. Такие добавки способствуют повыше-

нию твердости и износостойкости хромистых чугунов. В работе [38] показано влияние добавок ниобия, титана и церия на микроструктуру свойства хромистых чугунов. Добавки ниобия (3%) образовали карбиды, которые повысили износостойкость на 30%. Титан и церий повлияли на процесс кристаллизации. Добавление титана (0.26%) привело к существенному изменению морфологии и распределения карбидов NbC. Вторичные карбиды титана оказали влияние на характеристики истирания и вязкость разрушения. В литом состоянии сплав, содержащий 0.28% Ti и 0.19% Ce, имел микроструктуру перлитно-аустенитной матрицы. Перлит, благодаря своей высокой микротвердости, улучшил износостойкость в условиях абразивного износа с низким напряжением, но резко снизил ударную вязкость сплава.

В ряде работ [39-41] проводились исследования по влиянию титана на износостойкость хромистых чугунов. Как утверждают авторы [39] титан образует частицы TiC, которые могут стать центрами кристаллизации эвтектических карбидов  $M_7C_3$  и аустенита. Появление карбидов титана позволяет получать повышенные характеристики износостойкости. Однако высокое содержание титана приводило к снижению ударной вязкости, так как карбиды титана агломерировались. По мнению авторов, образование агломерата напрямую связано с появлением двуплечных дефектов в микроструктуре отливки. Такие исследования показывают, как неправильный объем добавки может отрицательно сказаться на свойствах отливки.

Добавки титана (до 1.3–1%) приводят к выделению хорошо распределенных в аустенитной матрице мелких твердых частиц TiC, однако они агломерируются при высоком содержании Ti (1.78%) [40]. С дальнейшим увеличением добавления титана свойства ухудшаются из-за эффекта кластеризации частиц карбида титана в аустенитной матрице. Таким образом, показано, что оптимальная износостойкость и ударная вязкость белого чугуна (16%Cr, 1.3%Mo, 2.3%Ni) могут быть достигнуты путем добавления 1.31% титана.

Однако в работе [41] показано, что добавленный титан не действует как модификатор для уменьшения размера крупных первичных карбидов. Изучая влияние добавки титана (Ti до 6 мас. %) на микроструктуру и износостойкость заэвтектического высокохромистого чугуна (Fe–25 мас. % Cr–4 мас. % C) авторы показывают, что увеличение количества титана приводит к изменению микроструктуры с заэвтектической на доэвтектическую из-за обеднения углерода, который потребляется титаном с образованием карбидов титана. При добавлении 2 мас. % Ti была получена мелкая микроструктура, которая соответствовала эвтектической структуре со смешанными карбидами хрома и карбидами титана. Эвтектическая структура показала самую высокую износостойкость и твердость благодаря улучшенной микроструктуре, а также тому факту, что некоторое количество карбидов хрома было заменено карбидами титана, которые тверже их.

Модифицирование высокохромистого чугуна магнием приводит к повышению износостойкости как описано в работе [42]. Показано, что обработка чугуна магнием приводит к очистке чугуна от поверхностно-активных элементов (рафинированию) и созданию ультрадисперсных центров кристаллизации с образованием мелкодис-

персной карбидной фазы. Такое получение мелкодисперсной структуры позволило повысить прочностные свойства, и износостойкость.

В высокохромистом чугунае появлению мелких твердых частиц способствуют и добавки ниобия [43]. Добавление ниобия (до 3.4 мас. %) приводит к появлению мелких твердых частиц NbC в заэвтектическом аустените, что препятствует развитию роста аустенитных дендритов. За счет измельчения структуры твердость и износостойкость увеличивается. Как утверждают авторы [43] эти частицы вызвали обеднение углерода в аустенитной матрице, и, таким образом, большая часть аустенита преобразовалась в мартенсит при термообработке.

Добавки ванадия также снижают содержание углерода в сплаве, образуя первичные карбиды ванадия [44]. Здесь описано, что появление карбидов ванадия, а также мартенсита/аустенита в матрице и количества вторичных карбидов, выделившихся во время дестабилизирующей термообработки, повышают твердость и износостойкость.

В работе [45] исследовали влияние добавок церия на макро- и микроструктуру высокопрочного чугуна с большим содержанием кремния. Выявлено, что добавки церия изменяют структуру серого чугуна на белый чугун. Такое преобразование вызвано не легированием, а сильным раскисляющим свойством церия. Механические свойства этого сплава оказались выше, чем у ковкого чугуна. Регулируя количеством церия, углерода и кремния можно изготавливать отливки с еще большим сечением утверждают авторы.

В работах [46,47] также предлагают модифицировать белые чугуны редкоземельными металлами (бор, ниобий, самарий, церий) для повышения их износостойкости. В работе [48] в чугунах марок ИЧ220Х18Г4НТ, ИЧ270Х24НТБР, ИЧХ28Н2 предлагают проводить раскисление и рафинирование-модифицирование кальций-стронциевым карбонатом (Ca, Sr)CO<sub>3</sub>, ферробором ФБ23 (FeB), силикокальцием СК-20 (Si-Ca), бор-титан-алюминиевой лигатурой БФТ-1, а также проводить процесс термовременной обработки (ТВО). Такое совместное влияние ТВО и модификаторов на расплавы обеспечило повышение всех показателей. Повысилась жаростойкость, ударно-абразивная износостойкость. Применение ТВО и комплексного модификатора как отдельно, так и совместно улучшает комплекс литейных свойств чугуна ИЧХ28Н2: увеличивает жидкотекучесть, снижает линейную усадку, повышает трещиностойкость чугуна, что делает этот сплав более технологичным для получения сложных фасонных отливок.

При производстве хромистых чугунов одна из самых больших проблем является горячее растрескивание. При литье еще в полутвердом состоянии появляются трещины. В работах [49-50] исследуя влияние содержания молибдена, температуры разлива и скорости охлаждения на появление трещин в отливках из высокохромистого белого чугуна, выявлено, что содержание молибдена и температура разлива существенно влияют на эти дефекты литья. Износостойкость зависит от матрицы. Когда матрица является ферритной однофазной, независимо от содержания Мо, потери от износа большие, а когда матрица многофазна потери износа стремятся к нулю. Ферритная матрица пластически деформируется и способствует образованию карбидных микротрещин, что

приводит к хрупкости. Микротрещины всегда появляются в отливках с эвтектическими или первичными карбидами М<sub>7</sub>С<sub>3</sub>, но не с М<sub>6</sub>С. Карбиды М<sub>6</sub>С намного лучше способствуют повышению износостойкости сплава, предполагают авторы.

В работе [50] показано, что высокое содержание хрома (16-32%) приводит к образованию большой объемной доли эвтектических карбидов М<sub>7</sub>С<sub>3</sub>, а при добавлении молибдена (в количестве более 3 мас. %) образуются новые карбиды (М<sub>2</sub>С, М<sub>6</sub>С), которые значительно повышают стойкость к износу. Твердость увеличивается с увеличением содержания Мо, а потери на износ уменьшаются.

Таким образом, модифицирование и скорость охлаждения сплава способствуют регулированию первичной кристаллизации и изменению степени дисперсности кристаллизующихся фаз образуя нужную микроструктуру сплава. А в свою очередь микроструктура является показателем механических и эксплуатационных свойств. Определяя морфологию, размер, а также распределение и связанность карбидов и матрицы можно описать эксплуатационные свойства чугуна. Так в работе [51] корреляцию между твердостью и износостойкостью белого чугуна с высоким содержанием хрома, при одинаковой твердости сплавов, определяли морфологией, размером, а также распределением и связанностью карбидов и матрицы.

Как было показано выше, на формирование структуры и свойств отливок влияет и технология получения отливки. В некоторых работах [10-15] предлагают рациональные температурные интервалы заливки чугуна в формы, позволяющие предотвратить появление зоны столбчатых кристаллитов, нежелательной морфологии карбидов, образованию пригара и трещин. При выборе температуры кристаллизации учитывается и переохлаждение (т.е скорость охлаждения отливки), которая меняет скорость образования центров и линейную скорость роста кристаллов. Это в свою очередь зависит от толщины отливки, типа литейной формы, температуры заливки и неодинаковой скорости кристаллизации на поверхности и в центре отливки, особенно массивной. Ассортимент отливок из износостойких высокохромистых чугунов по массе и толщине стенок большой, значит, широк и диапазон скоростей охлаждения отливок в интервале кристаллизации. По данным [2, 52-54] он составляет 0.5-200°C/мин. Поэтому могут меняться структура и свойства чугуна одного и того же состава при изготовлении из него отливок различных конфигураций, массы, толщины стенки. Для небольших толщин отливок (до 30 мм) свойства и структура их не очень отличается как для песчано-глинистых форм, так и для кокиля. Увеличение же толщины отливки приводит к снижению скорости охлаждения и соответственно к изменению строения металлической матрицы и карбидов. Появляется остаточный аустенит, укрупняются карбиды, также различается дисперсность структуры в середине отливки и на поверхности [10]. В подтверждение этому в работе [55] описано отличие дисперсности структуры в середине отливки и на поверхности. При получении заэвтектического износостойкого чугуна проводили модифицирование силикокальцием и добавлением 0.025–0.035% Al, 0.004–0.006% Bi, или Te, или теллурида висмута Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>. Температура ввода модификаторов составляла около 1450°C и разлива перед выпуском 1450-1500°C. В ре-

зультате получена мартенситная матрица, в которой располагались пластины карбидов. Микроструктура в центре и на краю образца отличалась размерами структурных составляющих: на краю образца в основном наблюдалась дисперсная структура с островковыми и глобулярными карбидами. В центре образца были зафиксированы крупные вытянутые карбиды. При эксплуатации этих отливок (лопаток камнедробильных) был установлен рост ресурса работы более чем на 20%.

### 3. Выводы

Таким образом, рассматривая основные разновидности процессов повышения механических и эксплуатационных свойств износостойких хромистых чугунов видно, что все действия связаны с воздействием на структуру кристаллизующегося металла.

Для обеспечения качества изделия необходимо структурное управление расплавами хромистого износостойкого чугуна, которое может осуществляться путем оптимизации легирования, модифицирования, разработки рациональных технологических процессов. И для этого необходимы исследования по проведению подбора и расчета легирующих и модифицирующих элементов, а также оптимизации температуры заливки.

Необходимо подобрать нужную концентрацию элементов модификатора, которая должна находиться в узких пределах, для решения проблемы усвоения элементов и эффективного воздействия на расплав. Избыточное или недостаточное содержание элементов может привести к ухудшению структуры и соответственно свойств металла.

Как показывает обзор исследований для повышения эксплуатационных свойств чугуна необходимо комплексное модифицирование активными элементами, и чтобы они имели различный механизм. Эти элементы должны образовывать в расплаве высокодисперсные твердые частицы, на которых формируются центры кристаллизации. Также должны быть растворимые вещества (например, поверхностно-активные вещества), избирательно адсорбирующиеся на гранях кристаллического зародыша, изменяющие межфазное поверхностное натяжение и характер роста кристаллов. Следовательно, сочетание комплексных модификаторов будет способствовать эффективному модифицированию и создаст возможности получения особо мелких и специальных структур.

Комплексное модифицирование веществами, содержащими редкоземельные металлы или наноструктуры, однозначно приведет к изменению размеров эвтектических карбидов и неметаллических включений в хромистом чугуне, снижению содержания вредных примесей, устранению зоны столбчатых кристаллов и измельчению литого зерна. Вместе с тем необходимо выбрать рациональные температурные интервалы заливки чугуна и осуществить подбор литейной формы. Образование равномерно распределенных сложных карбидов в металлической матрице будет способствовать повышению износостойкости и прочности чугуна.

Таким образом, обзор научно-исследовательских работ в области получения износостойких хромистых чугунов показывает, что необходимо проводить работы по совершенствованию технологии управления процессами формирования макро- и микроструктуры сплавов путем

оптимизации легирования, модифицирования, разработки рациональных технологических процессов. Варьируя химический состав и режимы термической обработки, путем введения в металл модифицирующих добавок, применяя специальные технологические методы улучшения структуры, можно синтезировать материалы, обладающие комплексом высоких физико-механических свойств и износостойкостью.

### Литература / References

- [1] Gavriljuk, V.P., Tihonovich, V.I., Shalevskaja, I.A. & Gut'ko, Ju.I. (2010). *Abrazivostojkie vysokohromistye chuguny: monografija. Lugansk: Noulidzh*
- [2] Garber M.E. (2010). *Iznosostojkie belye chuguny: svojstva, struktura, tehnologija, jekspluatacija. M: Mashinostroenie*
- [3] Cypin, I. I. (2000). *Belye iznosostojkie chuguny – jevoljucija i perspektivy. Litejnoe proizvodstvo, 9, 15-16*
- [4] Gol'dshtejn, Ja.E., Gol'dshtejn, V.A. (1995). *Metallurgicheskie aspekty povyshenija dolgovechnosti detalej mashin. Cheljabinsk: Metall*
- [5] Truhin, V.V., Pechen', P.V. & Truhina, E.Ju. (2001). *Vlijanie termicheskoj obrabotki na obrabatyvaemost' srednehromistogo iznosostojkogo chuguna. Vestnik KuzGTI, 5, 31-34*
- [6] Kosilov, A.A., Kruglov, A.A. & Rebonen, V.N. (2001). *Termicheskaja obrabotka vysokohromistogo chuguna. Litejnoe proizvodstvo, 6, 13-14*
- [7] Filipov, M.A., Lhagvadorzh, P. & Plotnikov, G.N. (2000). *Strukturnye faktory povyshenija iznosostojkosti belogo hromistogo chuguna. Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov, 11, 10-13*
- [8] Emeljushin, A.N. (2000). *Vlijanie titana i bora na iznosostojkost' chuguna, prednaznachennogo dlja mehanicheskoj obrabotki nemetallicheskih materialov instrumenta iz hromistyh chugunov. Izvestiya vuzov. Chernaja metallurgija, 2, 28-29*
- [9] Ri, Je.H., Ri, Hosen, Tejh, V.A. & Muromceva, E.V. (2000). *Korroziionnaja stojkost' i zharostojkost' legirovannyh belyh chugunov. Litejnoe proizvodstvo, 3, 13-17*
- [10] Kolokol'cev, V.M. (1995). *Teoreticheskie i tehnologicheskie osnovy razrabotki litejnyh iznosostojkih splavov sistemy zhelezo-uglerod-jelement (Doctoral dissertation). Magnitogorsk*
- [11] Petrochenko, E.V. (2012). *Osobennosti kristallizacii, formirovanija struktury i svojstv iznosostojkih i zharostojkih chugunov v razlichnyh uslovijah ohlazhdenija (Doctoral dissertation). Magnitogorsk*
- [12] Sorokin, G.M. (1990). *Aspekty metallovedenija v probleme dolgovechnosti mashin. Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov, 2, 57-60*
- [13] Astashkevich, B.M. (1995). *Povyshenie nadezhnosti zheleznodorozhnyh tormoznyh kolodok. Litejnoe proizvodstvo, № 6, 5-6*
- [14] Vasenko, Ju. A. (2011). *Modelirovanie iznosostojkosti chuguna, legirovannogo titanom, po dannym passivnogo jeksperimenta. Technology audit and production reserves, 2(2), 3-8*
- [15] Kolokol'cev, V.M., Muljavko, N.M., Vdovin, K.N. & Sinickij, E.V. (2004). *Abrazivnaja iznosostojkost' lityh metallov i splavov. Magnitogorsk: MGTU*

- [16] Kolokol'cev, V.M., Adishhev, V.V. & Miljukov, S.V. (1992). Issledovanie iznosostojkosti chugunov dlja lityh bandazhej drobil'no-razmol'nogo oborudovanija. *Antifrikcionnye i iznosostojkie chuguny: Materialy mezhdunar. nauch.-tehn. konf., Vinnica*, 30–31
- [17] Romanov, O.M., Kozlov, L.Ja., Romanov, L.M., Rozhkova, E.V. et al. (1991). Karbidoobrazovanie v rasplavah vysokohromistyh chugunov. *Litejnoe proizvodstvo*, 6, 7
- [18] Kolokol'cev, V.M., Aksenov, V.N., Zabelin, N.R. et al. (1994). Sovershenstvovanie rezhimov plavki vysokohromistogo chuguna i termoobrabotki otlivok iz nego. *Litejnoe proizvodstvo*, 3, 5–6
- [19] Baum, B.A., Tjagunov, G.V., Baryshev, E.E. et al. (1996). Termovremennaja obrabotka zhidkih splavov i stali. *Stal'*, 6, 16–20
- [20] ZumGahr, K.H. (1998). Wear by hard particles. *Tribol. Int.*, 10(31), 587-596
- [21] Popov, V.S., Nagornyj, P.L. & Shumikin, A.B. (1971). Svjaz' mezhdru iznosostojkost'ju i jenergiej razrushenija uprochnjajushhej fazy splavov. *FHMM*, 1, 41-47
- [22] Archard, J.E. (1953). Contact andrubleing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, (24), 981-988
- [23] Abd El-Aziz, Kh., Zohdy, Kh., Saber, D. & Sallam, H.E.M. (2015). Wear and Corrosion Behavior of High-Cr White Cast Iron Alloys in Different Corrosive Media. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s40735-015-0026-8>
- [24] Rabinowicz, E. (1995). Friction and wear of materials (2<sup>nd</sup> ed.). *John Wiley & Sons*
- [25] Ri, H., Ri, Je.H., Rabzina, A.S., Kuharenko, E.B. & Dorofeev, S.V. (2006). Sintez kompleksnolegirovannyh belyh chugunov v litom i termoobrabotannom sostojanijah. *Litejnoe proizvodstvo*, 7, 2-4
- [26] Ri, Je.H., Rabzina, A.S., Kolokol'cev, V.M., Ri, H., Kuharenko, E.B. & Dorofeev, S.V. (2006). Vlijanie legirujushhijh jelementov na korrozionnuju stojkost' nizkouglerodistogo belogo chuguna. *Litejnoe proizvodstvo*, 7, 5-8
- [27] Ri, Je.H., Ri, H., Kolokol'cev, V.M., Petrochenko, E.V. et al. (2006). Kompleksno-legirovannye belye chuguny funkcional'nogo naznachenija v litom i termoobrabotannom sostojanijah. *Vladivostok: Dal'nauka*
- [28] Kolokol'cev, V.M., Gol'cov, A. S., Shevchenko, A.V., Molochkova, O.S., Voronkov, B.V. (2009). Povyshenie sroka sluzhby detalej iz zharoiznosostojkijh chugunov. *Litejshhik Rossii*, 6, 9–12
- [29] Kolokol'cev, V.M., Petrochenko, E.V., Shevchenko, A.V. & Gol'cov, A.S. (2009). Vlijanie mikrolegirovanija i modifizirovanija na svojstva zharoiznosostojkijh chugunov. *Trudy 9 s'ezda litejshhikov Rossii, Ufa*, 12–15
- [30] Kolokol'cev, V.M., Shevchenko, A.V. (2011). Povyshenie svojstv otlivok iz chugunov special'nogo naznachenija putem rafinirovanija i modifizirovanija ih rasplavov. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 1, 23–29
- [31] Svejn, O.O., Skaland, T. & Hartung, K. (2005). Modifizirovanie seryh i vysokoprochnyh chugunov. Sravnenie centrov kristallizacii grafita i nekotorye praktičeskie rekomendacii po modifizirovaniju. *Metall i lit'e Ukrainy*, 11-12, 63
- [32] Uskenbaeva, A.M., Volochko, A.T., Shamel'hanova, N.A., Korolev, S.P. & Shegidevich, A.A. (2016). Vlijanie nanouglerodnyh dobavok na grafitizaciju i tribologičeskie svojstva serogo chuguna. *Metallurg*, 2, 64-69
- [33] Uskenbaeva, A.M., Shamel'hanova, N.A. (2016). Ocenka modifizirujushhej sposobnosti nanostrukturnyh dobavok k chugunu. *Vestnik KazNITU*, 2(114), 184-190
- [34] Braun, M.P. (1969). Modifizirovanie i mikrolegirovanie stalej redkimi i redkozemel'nymi metallami. *Izvestiya Vuzov. Chernaya Metallurgija*, 12, 110-113
- [35] Davydov, S.V., Panov, A.G. & Kornienko, A.Je. (2006). Rynok modifikatorov – haos ili razvitie? *M: Metallurgija Mashinostroenija*, 3, 8-9
- [36] Xiao, Y.D. Liao, M., Wang, W., Liu, E. & Xiao, Z.-P. (2007). Effect of chromium alloying and complex modification on structures and properties of white cast iron. *ZhongnanDaxueXuebao (ZiranKexue Ban). Journal of Central South University (Science and Technology)*, 38, 1067-1071
- [37] Ri, H., Dzjuba, G.S., Ri, Je.H., Ermakov, M.A. & Mamontova, E.S. (2015). Upravlenie strukturaj i svojstvami hromistyh belyh chugunov putem ih modifizirovanija. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 11-1(22)
- [38] Filipovic, M., Kamberović, Ž., Korac, M. & Gavrilovski, M. (2013). Microstructure and mechanical properties of Fe–Cr–C–Nb white cast irons. *Materials & Design*, 47, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.034>
- [39] Dojka, M., Stawarz, M. (2020). Bifilm Defects in Ti-Inoculated Chromium White Cast Iron. *Materials*, 13(14), 3124. <https://doi.org/10.3390/ma13143124>
- [40] Ibrahim, Kh. (2012). Effect of titanium addition on structure and properties of the as-cast high Cr-Mo white iron. *Journal of Materials Research*. <https://doi.org/10.3139/146.110643>
- [41] Chung, R., Tang, X., Li, D., Hinckley, B. & Dolman, K. (2009). Effects of titanium addition on microstructure and wear resistance of hypereutectic high chromium cast iron Fe–25wt.%Cr–4wt.%C. *Wear*, 1-4(267), 356-361. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.061>
- [42] Balashov, V.F., Holodnyj, A.P. (2021). Sposob poluchenija vysokohromistyh belyh iznosostojkijh chugunov. Retrieved from <https://findpatent.ru/patent/200/>
- [43] Ibrahim, M., El-Hadad, Sh. & Mourad, M. (2020). Influence of Niobium Content on the Mechanical Properties and Abrasion Wear Resistance of Heat-Treated High-Chromium Cast Iron. *International Journal of Metalcasting*, 15, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00474-7>
- [44] Sánchez, A., Bedolla-Jacuinde, A., Guerra, F.V. & Mejía, I. (2020). Vanadium Additions to a High-Cr White Iron and its Effects on the Abrasive Wear Behavior. *MRS Advances*, 5, 3077-3089. <https://doi.org/10.1557/adv.2020.414>
- [45] Homma, M., Minato, A., Meguro, H. & Yoshihiko, A. (2021). Some Investigations on the Cerium-treated Cast Iron, 777, 339-343. <https://doi.org/10.50974/00042091>
- [46] Gushhin, N. S., Nuraliev, F. A. (2017). Belyj iznosostojkij chugun. *Patent 2640367*
- [47] Gushhin, N. S. (2017). Ligatura dlja rafinirovanija i modifizirovanija hromistyh chugunov. *Patent 2640368*
- [48] Kolokol'cev, V.M., Shevchenko, A.V. (2011). Povyshenie svojstv otlivok iz chugunov special'nogo naznachenija putem rafinirovanija i modifizirovanija ih rasplavov. *Vestnik MGTU im G.I. Nosova*, 1, 2-4

- [49] Dugic, I. (2017). Effect of Molybdenum Content, Pouring Temperature and Cooling Rate on the Casting Defects of High Chromium White Cast Iron. *146th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham.* [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51493-2\\_45](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51493-2_45)
- [50] Scandian, C., Boher, C., Biasoli de Mello, J.D. & Rézaï-Aria, F. (2009). Effect of molybdenum and chromium contents in sliding wear of high-chromium white cast iron: The relationship between microstructure and wear. *Wear*, 1-4(267), 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.095>
- [51] Camurri, C., Maril, J. & Romero, E. (2020). Effect of the Morphology, Size, Distribution and Homogeneity of Carbides and Matrix on Wear Resistance in High Cr-Alloys White Cast Iron. *Materials Science Forum*, 1016, 56-62. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1016.56>
- [52] Karpenko, M.I., Marukovich E.I. (1984). Iznosostojkie otlivki. *Minsk: Nauka i tehnika*
- [53] Cypin, I.I. (1988). Belye iznosostojkie chuguny. *Struktura i svojstva. M: Metallurgija*
- [54] Sherman, A.D., Zhukova, A.A. (1991). Chugun. *Sprav.izd. M: Metallurgija*
- [55] German, M.L., Rumjanceva, G.A. & Ratnikov, P. Je. (2017). Tehnologija vyplavki jeksperimental'nogo iznosostojkogo hromistogo chuguna. *Minsk: BNTU.* Retrieved from <http://surl.li/fglkc>

## Үйкеліске төзімді хромды шойындардың қасиеттерін жоғарлату тенденциялары

А.М.Ускенбаева\*, А.В. Паничкин, А.А. Мамаева, А.К. Кенжегулов, Б.Б. Кшибекова

*Satbayev University, Металлургия және кең байыту институты, Алматы, Қазақстан*

\*Корреспонденция үшін автор: [almauskenbaeva@mail.ru](mailto:almauskenbaeva@mail.ru)

**Андатпа.** Мақалада, үйкеліске төзімді хромды шойындардың қасиеттерін жоғарлатуна бағытталған микролегірілеу және түрлендіру элементтері арқылы пештен тыс өндеу бағыты бойынша әр түрлі әдістемелер қарастырылған. Шойын бұйымдарының жұмыс істеу кезінде үйкеліске байланысты істен шығуына қарай осындай құймалардың эксплуатациялық және қызметтік сипаттамаларының сапасын арттыру үшін олардың шығу технологияларын жетілдіру қажет. Үйкеліске төзімді хромды шойындардың тазарту мен түрлендіру әдіснама жұмыстарының сараптамасы қарастрылды. Осы бағыт бойынша ары-қарай зерттеу жұмыстарын жетілдіру тұралы ұсыныс жасалды. Құймалардың қажет микроқұрылымдарын алу үшін балқыманы тазарту мен түрлендіру және кристалдану жылдамдық үдерістерін тиімді технологияларын іздеп табу жұмыстары келтірілген. Үйкеліске төзімді хромды шойындардың қасиеттерін жоғарлату бағытында тиімді легірілеу, модификациялау сонымен қатар рационалды технологиялық үдерістерді жетілдіру үшін осындай жұмыстар керек екендігі көрсетілген.

**Негізгі сөздер:** шойын, хромды, үйкеліске төзімді, карбид, микроқұрылым.

## Тенденции повышения свойств износостойких хромистых чугунов

А.М. Ускенбаева\*, А.В. Паничкин, А.А. Мамаева, А.К. Кенжегулов, Б.Б. Кшибекова

*Satbayev University, Институт металлургии и обогащения, Алматы, Казахстан*

\*Автор для корреспонденции: [almauskenbaeva@mail.ru](mailto:almauskenbaeva@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрены различные виды способов повышения износостойкости и эксплуатационных характеристик износостойких хромистых чугунов, связанных с процессами воздействия на структуру кристаллизующегося металла путем внепечной обработки расплава микролигирующими и модифицирующими элементами. К качеству этих отливок предъявляются требования по эксплуатационным и служебным характеристикам, что делает необходимым совершенствование их состава и технологии производства, так как при эксплуатации износостойких хромистых чугунных деталей машин, работающих в условиях трения, главной причиной выхода их из строя является износ. Проведен анализ работ для совершенствования способов рафинирования и модифицирования износостойкого хромистого чугуна. Показана необходимость проведения дальнейших работ по совершенствованию способов получения износостойких хромистых чугунов. Работа направлена на изыскание технологий управления процессами формирования необходимой микроструктуры сплавов через выбор оптимального состава, рафинирование, модифицирование, скорость кристаллизации литой структуры. Выявлено, что для обеспечения качества изделия необходимо структурное управление расплавами хромистого износостойкого чугуна, которое может осуществляться путем оптимизации легирования, модифицирования, разработки рациональных технологических процессов. И для этого необходимы исследования по проведению подбора и расчета легирующих и модифицирующих элементов, а также оптимизации температуры заливки.

**Ключевые слова:** чугун, хромистый, износостойкий, карбиды, микроструктура.