



УДК 621.74

Поступила 06.10.2021

## ПРИМЕНЕНИЕ АЗОТИРОВАННЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ И ЛИГАТУРЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ

*Н. А. ФЕОКТИСТОВ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Челябинская обл., Россия, пр. Ленина, 38. E-mail: fna87@mail.ru*

*Представлены результаты исследований по легированию, микролегированию и модифицированию высокомарганцевой стали и валковых сплавов азотированными ферросплавами (лигатурой).*

*Кроме того, приведены результаты металлографических исследований, позволившие обосновать изменение уровня эксплуатационных свойств высокомарганцевой и валковой сталей, чугуна. Также оценено влияние тепловых условий формирования литых изделий, в частности скорости охлаждения сплава в литейной форме, на уровень эксплуатационных свойств.*

*Определено влияние Cr, Ti, V совместно с N на износостойкость отливок из высокомарганцевой стали. Отдельно рассмотрено влияние азотированного феррохрома на комплекс свойств валковой стали. Определена концентрация хрома и азота, при которой валковая сталь имеет максимальную износостойкость. Показано влияние азотированного ванадия на индифинитный валковый чугун. Рассмотрено влияние ванадия на процесс выделения графита в валковом чугуне. В заключительной части статьи сформулированы выводы по результатам проведенных исследований. Также даны технологические рекомендации для практической реализации результатов работ с целью повышения уровня эксплуатационных свойств литых изделий из высокомарганцевой стали и валковых сплавов.*

**Ключевые слова.** *Высокомарганцевая сталь, валковая сталь и чугун, аустенит, графит, скорость охлаждения, износостойкость.*

## APPLICATION OF NITRIDED FERROALLOYS AND LIGATURE TO IMPROVE THE PERFORMANCE PROPERTIES OF CAST PARTS

*N. A. FEOKTISTOV, Magnitogorsk State Technical University named G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia, 38, Lenina ave. E-mail: fna87@mail.ru*

*The results of researches according alloying, microalloying and modifying of high-manganese steel and roll alloys by nitrated ferroalloys (ligature) are presented.*

*Besides, results of metallographical tests were given which allowed to substantiate change of the level of performance properties of high manganese and roll steel, cast iron. Influence of thermal conditions of forming cast products was also evaluated, in particular speed of alloy cooling in foundry mold on the level of performance properties of alloyed casting alloys.*

*The influence of Cr, Ti, V together with N on the wear resistance of high-manganese steel castings has been determined. The influence of nitrated ferrochrome on the complex of properties of roll steel is considered separately. The concentration of chromium and nitrogen, at which the roll steel has the maximum wear resistance, has been determined. The effect of nitrated vanadium on indefinite roll cast iron is shown. The influence of vanadium on the process of graphite precipitation in cast iron is considered.*

*In final part of the article conclusions on the results of conducted researches were made. As well as manufacturing recommendations were given for practical implementation of work results to increase the level of performance properties of high manganese steel and roll alloys.*

**Keywords.** *High manganese steel, roll steel and cast iron, austenite, graphite, cooling speed, wear resistance.*

Производство износостойкого литья является сложной задачей литейных цехов. Постоянно повышающиеся требования к качеству продукции от потребителей требуют непрерывной работы над разработкой новых составов износостойких сплавов, а также совершенствования уже известных на данный момент.

Номенклатура фасонного износостойкого литья, изготавливаемого в ООО «Механоремонтный комплекс» (г. Магнитогорск), занимает более 30% от всего объема продукции. Продукция ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков» (г. Магнитогорск) полностью относится к сегменту, работающего в условиях интенсивного изнашивания.

Для обеспечения высокого уровня эксплуатационных свойств существующих сплавов необходимо применение новых перспективных материалов, которые, изменяя химический состав сплава, меняют, трансформируют параметры микроструктуры, что обеспечивает повышение износостойкости материала и самого изделия.

Следует отметить, что свойства материала в изделии зависят не только от химического состава сплава, но также от процессов кристаллизации изделий в литейной форме. В свою очередь, эти процессы будут определяться толщиной стенки отливки, теплоаккумулирующими способностями материала формы, температурой заливаемого сплава и многими другими параметрами.

Цель данной работы – определение влияния азотированных ферросплавов и лигатуры совместно с условиями кристаллизации литейного сплава на его износостойкость.

В качестве износостойких сплавов были выбраны сталь Гадфильда, заэвтектоидная валковая сталь марки 150ХНМ и половинчатый чугун для прокатных валков исполнения ЛПХНМд-71.

Влияние на условия кристаллизации таких факторов, как теплоаккумулирующая способность формы, толщина стенки отливки и некоторых других, можно оценить через скорость охлаждения расплава в литейной форме. В лабораторных условиях ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» были проведены эксперименты, результаты которых позволяют оценить влияние скорости охлаждения расплава на процессы структурообразования указанных сплавов. Полученные данные представлены на рис. 1.

Очевидно, что характер зависимостей для различных марок сталей одинаковый. Отличаются лишь количественные характеристики процесса кристаллизации, что связано с химическим составом сталей. Увеличение скорости охлаждения расплава высокомарганцевой стали в интервале кристаллизации в 5 раз приводит к снижению размера зерна аустенита в среднем с 300 до 120 мкм, в то время как в валковой стали происходит снижение размера действительного зерна в 3 раза. При увеличении скорости охлаждения расплава также снижается количество карбидной фазы, что, в свою очередь, повышает степень легированности твердого раствора [1–3]. Таким образом, условия охлаждения расплава в литейной

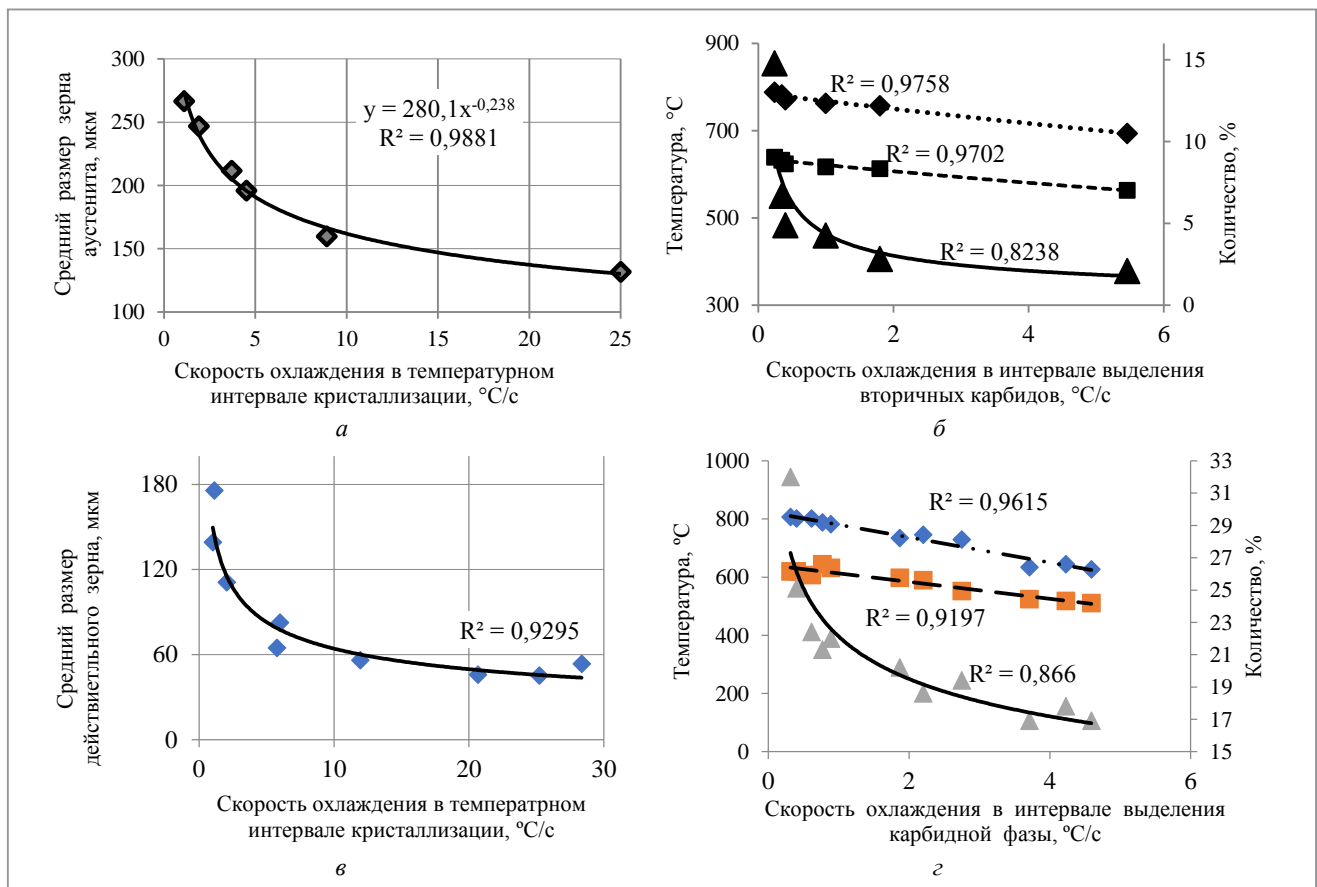


Рис. 1. Влияние скорости охлаждения расплава на размер зерна (а, в), количество карбидной фазы и температурные интервалы ее выделения (б, г): а, б – высокомарганцевая сталь; в, г – заэвтектоидная валковая сталь

форме могут влиять на перераспределение элементов в микроструктуре сплава, что приведет к изменению свойств без дополнительного легирования.

Однако воздействия на структуру через изменение условий охлаждения расплава в литейной форме бывает недостаточно либо отсутствует техническая возможность реализации подобного рода мероприятий в цехе. Поэтому повышение уровня механических и эксплуатационных свойств приходится осуществлять за счет легирования. Перспективным направлением повышения уровня свойств сплавов, работающих в условиях интенсивного изнашивания, является выделение нитридов в микроструктуре сплава.

В лабораторных условиях, а после этого в условиях промышленных площадок ООО «Механоремонтный комплекс» и ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков» были проведены экспериментальные работы по легированию высокомарганцевой стали, а также валковых сталей и чугунов азотированными материалами.

В качестве азотированных материалов для легирования и модифицирования стали Гадфильда были выбраны следующие материалы: азотированный феррохром марки ФХН-10, комплексная лигатура Ti-Ca-N, азотированный феррованадий марки ФВ35Н9. В ходе проведения экспериментов определяли коэффициенты абразивной и ударно-абразивной износостойкости, а также параметры микроструктуры. Результаты, полученные при исследовании высокомарганцевой стали, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства и параметры микроструктуры высокомарганцевой стали различных систем легирования

Легированные (модифицирующие) элементы	Коэффициент износостойкости $K_{из}$ , ед.		Параметры микроструктуры		Твердость HRB
	абразивной	ударно-абразивной	размер зерна, мкм	количество вторичной фазы, %	
Cr-N	1,44	1,66	120–150	1,5–2,2	85,5
Ti-Ca-N	1,74	1,88	250–350	0,5–1,2	92
V-N	1,82	2,45	100–200	1,0–1,5	96

В ходе выполнения исследований высокомарганцевой стали различных систем легирования определили коэффициенты распределения марганца и хрома между твердым раствором и избыточной фазой. Установили, что в первую очередь на этот коэффициент влияет скорость охлаждения расплава в литейной форме. Увеличение скорости охлаждения расплава в температурном интервале выделения вторичной фазы от 0,2 до 6,0 °C/c приводит к снижению коэффициента распределения марганца в среднем с 2,0 до 1,3, а хрома – с 4,0 до 1,2 [4, 5].

Перераспределение химических элементов между твердым раствором и вторичной фазой приводит к изменению как химического состава и свойств самого аустенита, так и свойств сплава в целом.

Прежде всего это отражается на микротвердости аустенита, а также его способности упрочняться под действием внешних нагрузок, в том числе в условиях абразивного изнашивания. Способность к упрочнению, как известно из литературного обзора, зависит от энергии дефектов упаковки твердого раствора.

Определив химический состав аустенита путем микрорентгеноспектрального анализа, провели расчет значений энергии дефектов упаковки:

$$\gamma_{SF}^{300} = \gamma_{SF}^0 + 1,59Ni - 1,34Mn + 0,06Mn^2 - 1,75Cr + 0,01Cr^2 + 15,21Mo - 5,59Si - 60,69(C+1,2N)^{\frac{1}{2}} + 26,27(C+1,2N)(Cr+Mn+Mo)^{\frac{1}{2}} + 0,61[Ni(Cr+Mn)]^{\frac{1}{2}}. \tag{1}$$

Сопоставив расчетные значения энергии дефектов упаковки высокомарганцевых сплавов различных систем легирования и значения абразивной износостойкости, получим зависимость, представленную на рис. 2.

Полученные данные позволили определить взаимосвязь скорости охлаждения расплава с энергией дефекта упаковки аустенита, а также ее влияние на геометрические параметры деформационных двойников и среднюю толщину упрочненного слоя на поверхности изнашивания, которая колеблется от 10 до 40 мкм [6].

Были разработаны технологические рекомендации по улучшению качества стали и чугуна для производства прокатных валков.

Исследовали валковую сталь марки 150ХНМ, а также индефинитный чугун для прокатных валков исполнения ЛПХНМд-71 (Ц).

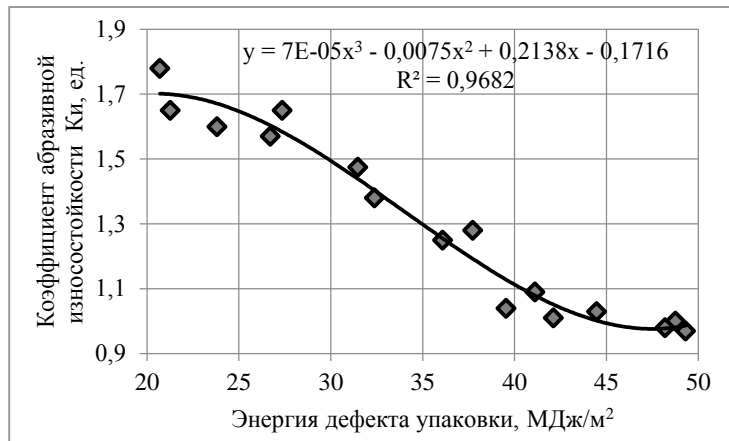


Рис. 2. Зависимость коэффициента износостойкости от энергии дефекта упаковки аустенита

Изучение процессов кристаллизации рабочего слоя прокатного вала, получаемого центробежным способом, проводили при помощи программного обеспечения СКМ ЛП «ПолигонСофт» 2019.5. Полученные результаты приведены на рис. 3. Очевидно, что разные области рабочего слоя охлаждаются с разными скоростями. Области, которые расположены ближе к торцу 1, 3, охлаждаются более интенсивно, чем центральная. Прежде всего это обусловлено обширной площадью соприкосновения отливки с изложницей в углу литейной формы и более интенсивным теплообменом. Следует отметить, что существенное различие в скоростях охлаждения рабочего слоя наблюдается в интервале кристаллизации стали: датчик 1 зафиксировал скорость охлаждения 0,35 °С/с, датчики 2 и 3 – 0,15 и 0,21 °С/с соответственно. Разница в скоростях охлаждения торцов отливки обусловлена различием конфигураций торцовых стенок изложницы – наличием и отсутствием отверстия для заливки сплава. Следует отметить, что скорости охлаждения валковых сплавов, полученных в результате лабораторных экспериментов, сопоставимы с промышленными условиями.

На начальном этапе изучения заэвтектоидной валковой стали были определены температурные интервалы выделения карбидной сетки по границам зерна аустенита. Проведенные исследования показали, что с увеличением скорости охлаждения расплава в литейной форме с 0,25 до 28,35 °С/с, т.е. по мере приближения к поверхности раздела металл – кокиль от центра бочки вала, происходит снижение температур начала и окончания выделения карбидной фазы с 807 до 626 °С и с 619 до 511 °С соответственно. При этом уменьшается температурный интервал выделения карбидной фазы с 188 до 115 °С.

Проведя лабораторные эксперименты, установили, что на исследуемую сталь существенное влияние оказывают углерод и хром. Следует отметить, что по отдельности они оказывают взаимно противоположное влияние. Увеличивая концентрацию углерода в заэвтектоидной валковой стали с 1,3 до 1,8%,

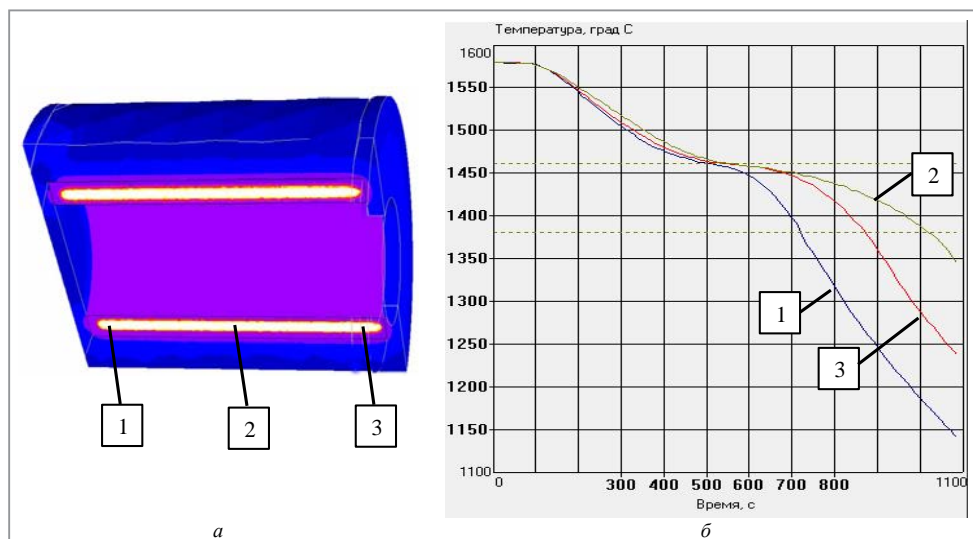


Рис. 3. Визуализация процесса кристаллизации (а) и кривые охлаждения рабочего слоя прокатного вала в изложнице (б): 1, 2, 3 – центральная часть сечения рабочего слоя, расположенная на расстоянии 100 мм (1, 3) от торца и в центре бандажа (2)

можно добиться увеличения коэффициента абразивной износостойкости с 2,0 до 2,5–2,7 ед. При этом увеличение концентрации хрома с 0,7 до 1,5% приводит к снижению коэффициента абразивной износостойкости с 2,7 до 1,5 ед. Такое влияние обусловлено изменением количества карбидной фазы, а также непропорциональным перераспределением углерода между цементитом и карбидами хрома.

При легировании стали марки 150ХНМ азотированным феррохромом марки ФХН-10 наблюдается несколько иная картина. Повышение концентрации хрома с 0,6 до 1,4% и азота с 0,028 до 0,062% приводит к повышению коэффициента абразивной износостойкости с 1,4 до 2,0% (рис. 4).

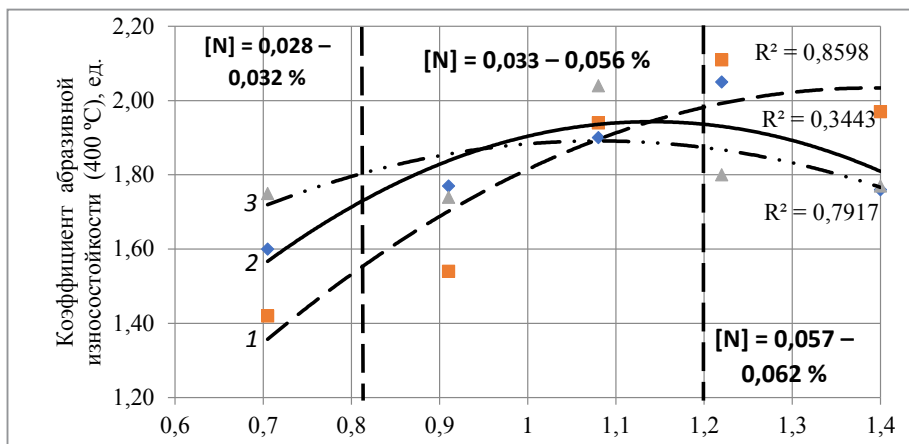


Рис. 4. Влияние азота и хрома на абразивную износостойкость валковой стали при скорости охлаждения в литевой форме: 1 – 5,77 °C/c; 2 – 11,94 °C/c; 3 – 28,35 °C/c (температура испытаний 400 °C)

Представленная зависимость обусловлена выделением карбонитридов и отдельных нитридов, которые препятствуют процессам изнашивания валковой стали. Следует отметить, что при использовании азотированного феррохрома имеется возможность снизить концентрацию хрома на 10–15% при сохранении заданного уровня эксплуатационных и механических свойств, а также параметров микроструктуры.

В индифинитном чугуна рабочего слоя предложили заменить обычный ванадий азотированным марки ФВ35Н9. Исследуемые чугуны отличались лишь концентрацией азота, что позволило оценить его влияние на уровень эксплуатационных свойств. Полученные зависимости приведены на рис. 5.

Концентрация азота была следующей: при содержании ванадия до 0,15% [N] = 0,015–0,023%; при содержании ванадия от 0,15 до 0,3% [N] = 0,026–0,042%; при концентрации ванадия свыше 0,3% [N] = 0,044–0,056%.

В ходе проведенных исследований было установлено, что максимальный уровень эксплуатационных свойств валкового чугуна при использовании азотированного феррованадия смещается в область концентраций ванадия от 0,05 до 0,20%, азота – от 0,015 до 0,023%. В случае применения неазотированного ванадия, т.е. отсутствия микролегирования азотом, максимальное значение коэффициента абразивной износостойкости валкового чугуна достигается при концентрации ванадия 0,5% [7, 8].

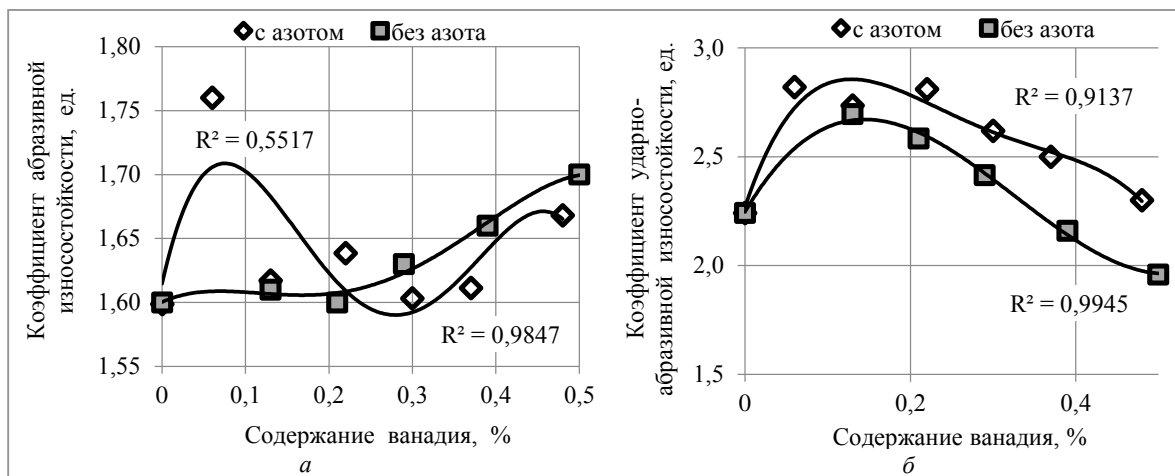


Рис. 5. Зависимость коэффициента абразивной (а) и ударно-абразивной износостойкости (б) чугуна для рабочего слоя прокатного вала от содержания в нем ванадия



Полученная зависимость обусловлена изменением параметров микроструктуры валкового чугуна.

В валковом индифинитном чугуне большое влияние на уровень эксплуатационных свойств оказывает графит. В процессе эксплуатации он выступает как смазка между прокатываемым металлом и валком, обеспечивая более высокий уровень эксплуатационной стойкости рабочего слоя.

Металлографические исследования показали, что при легировании исследуемого чугуна ванадием происходит постепенное уменьшение количества структурно-свободного углерода в микроструктуре. Так, при введении в расплав ванадия в количестве 0,3% содержание графита в микроструктуре снижается с 1,0 до 0,81%. Увеличение концентрации ванадия до 0,5% приводит к еще большему снижению количества графита до 0,4%.

Легирование чугуна рабочего слоя азотированным ванадием также приводит к уменьшению в структуре количества графита при увеличении его концентрации. Однако, несмотря на количество вводимой лигатуры, дополнительное легирование азотом приводит к сохранению в структуре графита на 0,2% больше, чем при легировании ванадием без азота.

Кроме того, в присутствии азота в сплаве графит имеет более мелкие размеры (8–10 мкм), а также равномерное распределение по сравнению со сплавом без азота.

При легировании исследуемого чугуна ванадием общее количество карбидной фазы незначительно повышается на 1–2% при изменении количества ванадия в сплаве от 0,13 до 0,4%. Это характерно как для легирования только ванадием, так и для легирования совместно с азотом [7, 8].

Также установили, что увеличение концентрации ванадия от 0,05 до 0,5% приводит к увеличению количества остаточного аустенита от 2,0 до 10,0–12,0%. При помощи рентгенофазового анализа определили, что минимальное количество остаточного аустенита наблюдается при концентрации ванадия и азота в сплаве до 0,1 и 0,02% соответственно.

### Выводы

1. Получены уточненные данные по коэффициентам различных видов износостойкости, а также установлено влияние азотированных ферросплавов и лигатур на уровень эксплуатационных свойств отливок из высокомарганцевой стали.

2. Определено влияние скорости охлаждения расплава в литейной форме на коэффициенты распределения химических элементов между твердым раствором и вторичной фазой, а также способность к упрочнению аустенита в зависимости от энергии дефектов упаковки твердого раствора.

3. Определено влияние азотированного феррохрома на эксплуатационные свойства заэвтектоидной валковой стали. Установлено, что при совместном легировании валковой стали хромом и азотом возможно снижение концентрации хрома без ущерба эксплуатационным свойствам прокатных валков.

4. Совместное легирование индифинитного чугуна ванадием и азотом позволяет снизить концентрацию ванадия с 0,5 до 0,1% без ухудшения эксплуатационных свойств, а также с получением минимального количества остаточного аустенита в микроструктуре сплава – менее 2,0%.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Gorlenko D., Vdovin K., Feoktistov N. Mechanisms of cast structure and stressed state formation in hadfield // Steel China Foundry. 2016. Vol. 13. № 6. С. 433–442.
2. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. The effect of the cast high-manganese steel primary structure on its properties // Materials Science Forum. 2016. Vol. 870. С. 339–344.
3. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А. и др. Исследование влияния процесса кристаллизации стали марки 110Г13Л на ее свойства // Литейные процессы. 2015. № 14. С. 29–36.
4. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А. Исследование влияния легирования и термической обработки на абразивную и ударно-абразивную износостойкость высокомарганцевой стали // Изв. высш. учеб. зав. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 11. С. 904–909.
5. Колокольцев В.М., Вдовин К.Н., Чернов В.П. и др. Исследование механизмов абразивного и ударно-абразивного изнашивания высокомарганцевой стали // Вест. Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 2. С. 54–62.
6. Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A. Influence of the packing-defect energy on the abrasive wear resistance of Fe-12Mn-1.2c steel castings cooled at different rates. Steel in Translation. 2016. Vol. 46. № 9. P. 614–619.
7. Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A., Kuryaev D.V. Study of the effect of isothermal holding on parameters of graphite phase in indefinite chromium-nickel cast iron alloyed by nitrogen and vanadium // CIS Iron and Steel Review. 2019. Vol. 17. P. 30–33.
8. Вдовин К.Н., Кошцева Н.В., Горленко Д.С., Феоктистов Н.А., Куряев Д.В. Влияние ванадия на особенности выделения карбидной фазы в индифинитных чугунах рабочего слоя прокатных валков // Сталь. 2019. № 4. С. 55–59.