

Цифровой эксперимент как метод повышения механических свойств стали Гадфильда

С. Л. Арапов, главный металлург¹, эл. почта: arapovsl@yandex.ru

С. В. Беляев, профессор², докт. техн. наук, эл. почта: 244812@mail.ru

А. А. Косович, старший научный сотрудник², канд. техн. наук, эл. почта: akosovich@sfu-kras.ru

Е. Г. Партыко, младший научный сотрудник², эл. почта: elforion@mail.ru

¹ООО «Инжиниринг Строительство Обслуживание», Ачинск, Россия.

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

Определен оптимальный состав высокомарганцевой аустенитной стали Гадфильда для получения отливок с повышенной ударной вязкостью и твердостью относительно стандартной марки. Химический состав стали подвергнут модификации в части расширения диапазона содержания Mn (12–19 %). Рассмотрено влияние комбинированного легирования комплексом элементов Cr, Mo, Ni. Проведены предварительное компьютерное моделирование и анализ пористости литых заготовок для определения места вырезки представительных образцов, необходимых для оценки фактического химического состава и механических свойств. Статистический анализ полученных результатов по содержанию элементов и ударной вязкости образцов выполнен при помощи функции желательности. Дальнейшая оптимизация модели осуществлена по методологии поверхности отклика. На основе анализа попарных взаимодействий предложены два экспериментальных состава стали Гадфильда. Проведено сравнение марки 110Г13Л с предложенными составами по уровню механических свойств и баллу зерна по микроструктуре. Сделан вывод о перспективности дальнейшего использования предлагаемого состава Fe – 1,1C – 16Mn – 0,8Si – 1,3Cr – Ni – Mo, способного повысить надежность отливок, эксплуатирующихся в условиях значительного износа.

Ключевые слова: сталь Гадфильда, аустенит, ударная вязкость, химический состав, легирование, PolygonSoft, функция желательности, методология поверхности отклика.

DOI: 10.17580/chm.2022.10.08

Введение

Большинство литых деталей дробильно-размольного и экскаваторного оборудования изготавливают из аустенитных высокомарганцевых сталей, которые в промышленной эксплуатации при контакте с различными материалами (руда, уголь, гравий и др.) подвергаются значительному изнашиванию: при скольжении детали по абразивному материалу проявляется микрорежущее и деформирующее действие единичной абразивной частицы. Ударно-абразивное изнашивание приводит к искажению поверхностных слоев детали и, вследствие протекания деформационных процессов внутри материала, к образованию микротрещин с последующим выкрашиванием отдельных зон. Воздействующие единичные ударные нагрузки, увеличивая концентрационное напряжение, приводят к распространению межкристаллитных трещин. Продолжительное ударное воздействие увеличивает раскрытие трещин, формируя кратер, который в дальнейшем разрушается частицами абразива. Вблизи пораженной поверхности происходит локальная рекристаллизация и возникает значительная разница в размерах зерна металлической матрицы [1–4].

Принимая во внимание особенности эксплуатации, среди широкого спектра высокопрочных марок сталь Гадфильда вызывает наибольший интерес благодаря способности к деформационному упрочнению, износостойкости при истирании и ударах, отсутствию ферромагнетизма при комнатной температуре до появления в структуре плотных плоскостей скольжения дислокаций, которые дробят зерна

на отдельные блоки. Однако именно измельчение блочной структуры в аустените и блокировка плоскостей скольжения карбидами являются основными причинами упрочнения стали при пластической деформации. Высокая твердость считается предпочтительной при сопротивлении истиранию, а пластичность имеет определяющее значение при рассмотрении ударопрочности [5–7].

В данных условиях надежность деталей на практике будет определяться структурой сплава, наиболее действенным воздействием на которую является добавка различных элементов. В работе [8] проведено сравнение стандартной стали Гадфильда с составом, легированным 1,5 % Al: при напряжениях до 0,64 Н/мм² предложенный вариант демонстрирует лучшие показатели предела текучести, начальной твердости и стойкости к износу, но сниженные предел прочности на растяжение, относительное удлинение и способность к упрочнению (наклепу). При напряжениях выше указанной границы ситуация обратная. Авторами работы [9] изучен износ под действием ударных нагрузок для композита на основе стали Гадфильда и карбида вольфрама (WC). Сталь, армированная более мелкими частицами WC, обладает лучшей износостойкостью, чем традиционный состав, независимо от уровня энергии удара. При вводе крупных частиц WC высокая износостойкость проявляется только при низкой энергии удара.

Легирование такими элементами, как хром, ванадий и молибден, способствует образованию тугоплавких карбидов Mn₂₃C₆ и Mn₇C₃, которые, располагаясь в аустените,

препятствуют продвижению абразивных частиц вглубь металлической основы. Немаловажна способность данных соединений выдерживать термическую обработку при температурах более 1050 °С в отличие от карбидов цементитного типа (например, (Fe, Cr)₃C), которые растворяются при температуре выше 1000 °С. Однако при аустенизации также растворяется значительное количество углерода и легирующих элементов, что может привести к выделению карбидов вдоль границы зерен аустенитной матрицы. Введение даже незначительного количества никеля способствует стабилизации аустенита, а сочетание Cr + Ni блокирует рост зерна аустенита. Способность комплекса Cr + Ni + Mo к формированию равномерной мелкозернистой структуры повышенной твердости поверхности и созданию благоприятных предпосылок для мартенситной трансформации улучшают показатели пластичности наряду с абразивной стойкостью [10–12].

Целью настоящего исследования является изменение состава стали Гадфильда (содержание 12–19 % Mn с введением Cr + Ni + Mo) для повышения ударной вязкости, т. е. способности сохранять целостность при ударных нагрузках. Для ее достижения применены статистические методы обработки и оптимизации.

Материал и методика исследования

Материалом исследования является высокомарганцевая аустенитная сталь, легированная Cr, Mo и Ni (табл. 1).

Выплавку сталей проводили в трехфазной электродуговой сталеплавильной печи с переменным током и основной футеровкой (>91 % MgO), что позволило выполнить

операции десульфурации и дефосфорации расплава. Шихта — стальной углеродистый лом. Корректировку химического состава по содержанию марганца проводили FeMn78 (ГОСТ 4755–91 [13]) и Mn95 (ГОСТ 6008–90 [14]), по молибдену — FeMo6 (ГОСТ 4759–91 [15]). Хром вводили в виде ферросплава FeCr010 (ГОСТ 4757–91 [16]), также использовался никель первичный Н-4 (ГОСТ 849–2018 [17]). Расплав диффузионно раскислен FeSi65 (ГОСТ 1415–93 [18]), остаточное раскисление выполнено алюминием АВ91 (ГОСТ 295–98 [19]).

Стали разливали в песчаные формы с получением заготовок размерами 100×100×80 мм. При этом для определения оптимального места вырезки образцов было выполнено предварительное моделирование литой заготовки с помощью программы СКМ ЛП «ПолигонСофт» 16.5 [20]. Данное программное обеспечение позволяет разработать и/или оптимизировать некоторые наиболее важные этапы технологического процесса не на реальной отливке, а на ее цифровом прототипе, что снижает затраты на проектирование и доводку литейной технологии, себестоимость продукции [21].

Моделирование литой заготовки выполняли при следующих граничных условиях: температура окружающей среды 20 °С, температура металла в начале литья — 1430 °С; материал разовой формы — жидкостекольная смесь с размером зерен кварца 0,4 мм; ликвидус сплава составил 1391 °С, температура солидуса — 1269,4 °С; скорость заливки расплава — 0,4 м/с (рис. 1, а). Результаты компьютерного моделирования показали, что усадочная пористость распространяется в отливке на глубину до 130 мм от места подачи металла (см. рис. 1, б), что свидетельствует о необходимости вырезки

Таблица 1

Содержание элементов в исследуемом составе, %

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P	Fe
0,96–1,40	12,4–19,4	0,54–1,02	0,96–1,72	0,24–0,47	0,01–0,52	≤0,02	≤0,05	Ост.

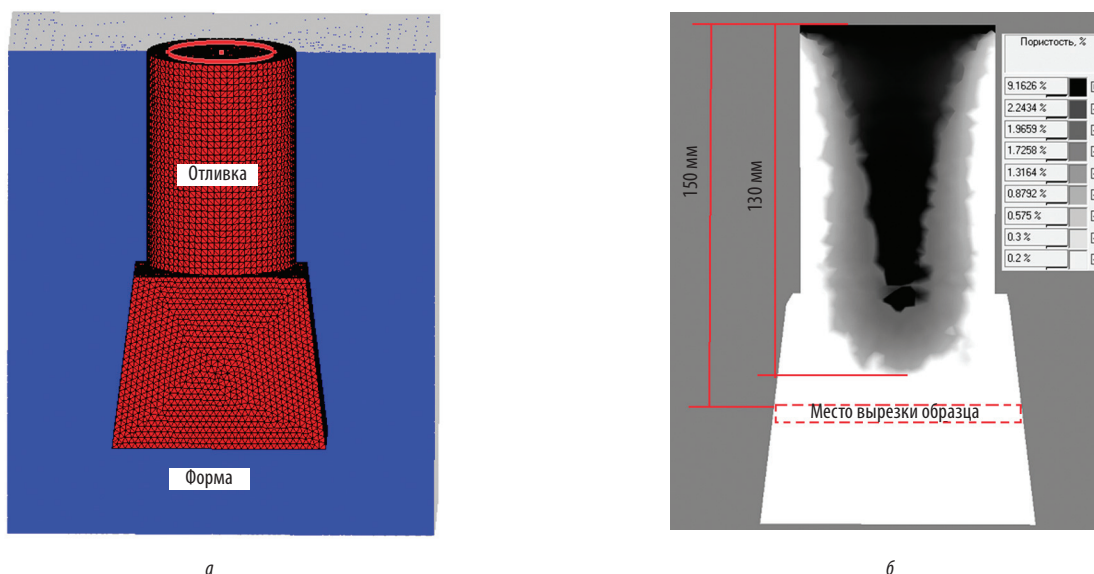


Рис. 1. Моделирование литой заготовки: а — сеточная модель; б — результаты расчета пористости

образцов для дальнейшего исследования химического состава и механических свойств из нижней половины заготовки.

Полученные литые заготовки подвергали термической обработке по следующему режиму: нагрев до 300 °С, выдержка 120 мин, нагрев до 700 °С, выдержка 180 мин, нагрев до 1150 °С, выдержка 480 мин, закалка в воде при 25 °С. Далее при помощи отрезного круга по металлу А-24-S-BF на станке ВРН-20 из них вырезали образцы для определения химического состава и ударной вязкости.

Поэлементный состав образцов определяли по ГОСТ Р 54153–2010 [22] на оптико-эмиссионном спектрометре МСАИ V5 (минимальный порог замера содержания элементов от 0,0001 %) в комплекте со стендом очистки аргона Эпишур-А 03 СЛ.

Метод определения ударной вязкости (ККУ) в соответствии с ГОСТ 9454–78 [23] заключается в разрушении образца размерами 55×10×10 мм, имеющего U-образный концентратор. Для получения значений использован маятниковый копер модели МК-30А с наибольшим запасом потенциальной энергии 30 Дж.

Микроструктуру исследовали при помощи оптической микроскопии с предварительным травлением реактивом на основе хлорного железа FeCl₃·6H₂O, персульфата аммония (NH₄)₂S₂O₈, соляной кислоты HCl и воды H₂O.

Твердость образцов определена на лабораторном испытательном твердомере ТШ-2 по методу Бринелля в соответствии с ГОСТ 9012–59 [24] с применением отсчетного микроскопа МПБ-2 (измерительная шкала — 0,05 мм) для измерения диаметра лунки.

Статистическую обработку экспериментальных данных выполняли в специализированном программном комплексе

Statistica (StatSoft) с применением функции желательности Дерринджера – Суич и методологии поверхности отклика. Функция желательности служит для поиска компромиссного значения между исследуемыми переменными, сочетание которых с наибольшей надежностью обеспечит заданные параметры системы. При этом каждый предсказанный отклик преобразуется в безразмерную частичную функцию желательности. Шкала функции желательности колеблется от совершенно нежелательного ответа до полностью желаемого ответа [25].

Методология поверхности отклика позволяет связывать дискретные экспериментальные результаты и представлять значения отклика системы в виде модели контурного графика. Анализ графической интерпретации полученной модели раскрывает возможность понимания взаимосвязей переменных параметров химического состава исследуемой стали, что позволяет определить не только точки оптимума, но и назначить доверительный интервал элементного состава стали, оптимизированного под заданные значения исследуемых свойств [26].

Результаты эксперимента и их обсуждение

В работе исследован 21 образец, химический состав и значения ударной вязкости которых представлены в **табл. 2**. Ввиду довольно низкого содержания серы (≤0,02 %) и фосфора (≤0,05 %), данные элементы были исключены из статистической обработки, что способствовало повышению точности и сокращению времени расчета.

На этапе первичной обработки результатов в качестве основной характеристики установлено значение ударной вязкости ККУ. Для исследуемого диапазона назначены

Таблица 2

Результаты анализа образцов

№	Химический состав, %									ККУ, кгс · м/см ²
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P	Fe	
1	1,22	16,29	0,64	1,06	0,41	0,23	0,01	0,043	Ост.	19,6
2	1,24	17,28	0,75	1,00	0,34	0,20	0,01	0,040	То же	18,4
3	1,26	17,52	0,71	1,51	0,45	0,36	0,01	0,025	–"	18,0
4	1,36	18,04	0,84	1,10	0,26	0,36	0,01	0,034	–"	19,8
5	1,39	19,35	0,78	1,14	0,26	0,52	0,01	0,023	–"	19,0
6	1,39	19,40	1,02	1,72	0,30	0,08	0,01	0,050	–"	10,5
7	0,96	12,40	0,61	0,37	0,17	0,01	0,01	0,050	–"	27,0
8	1,22	17,20	0,74	0,96	0,34	0,06	0,01	0,045	–"	18,8
9	1,24	18,70	0,76	1,14	0,37	0,38	0,01	0,020	–"	11,5
10	1,25	18,03	0,80	1,14	0,37	0,40	0,01	0,032	–"	12,0
11	1,24	18,46	0,54	1,34	0,45	0,37	0,01	0,028	–"	11,5
12	1,35	18,89	0,85	1,10	0,27	0,38	0,01	0,022	–"	19,0
13	1,25	18,19	0,55	1,32	0,44	0,41	0,01	0,033	–"	12,5
14	1,28	18,54	0,71	1,15	0,36	0,14	0,01	0,027	–"	16,0
15	1,30	18,54	0,71	1,15	0,36	0,14	0,01	0,027	–"	20,0
16	1,40	16,66	0,69	1,11	0,24	0,12	0,02	0,011	–"	18,3
17	1,31	16,84	0,65	1,13	0,25	0,14	0,01	0,015	–"	10,4
18	1,12	13,28	0,70	1,16	0,47	0,17	0,02	0,026	–"	15,8
19	1,10	14,75	0,68	1,13	0,46	0,14	0,01	0,043	–"	17,0
20	1,40	16,60	0,70	1,20	0,35	0,40	0,01	0,050	–"	18,0
21	1,40	16,55	0,73	1,16	0,35	0,37	0,01	0,050	–"	19,0

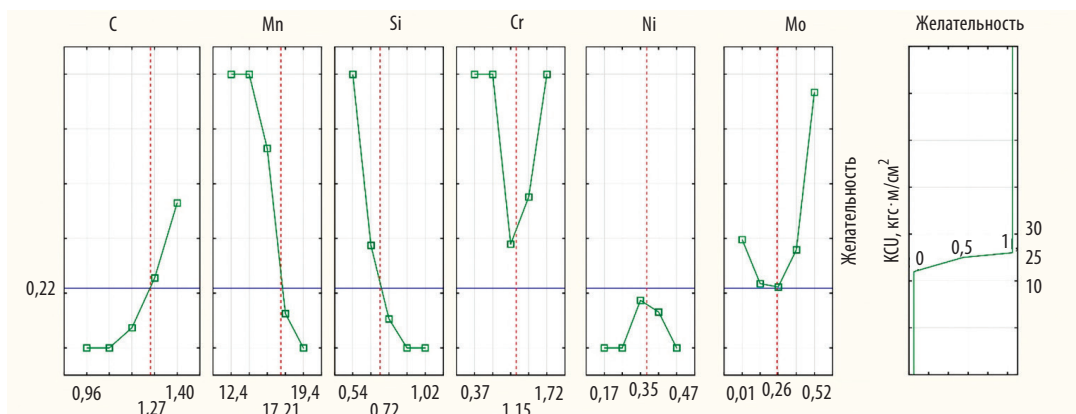


Рис. 2. Профиль прогнозируемой желательности для KCU = 25–30 кгс·м/см²

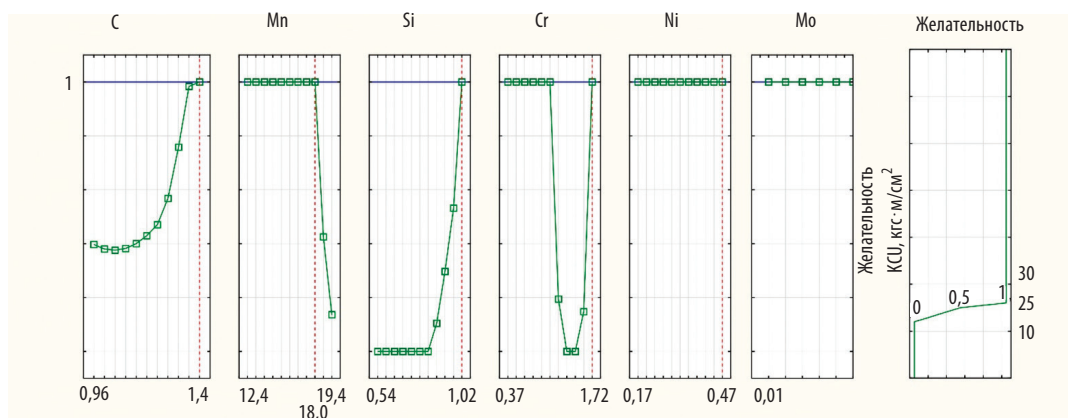


Рис. 3. Профиль оптимизированной модели для KCU = 25–30 кгс·м/см²

ограничения: приемлемый уровень — 25 кгс·м/см² (значимость 0,5), целевой — 30 кгс·м/см² (значимость 1,0). Надежность исходной модели составляет 0,22 (рис. 2), т. е. рассчитанный химический состав в точках оптимума не дает достаточной надежности (вероятности) для получения значений ударной вязкости в целевом диапазоне.

После оптимизации первичной модели значительно изменились точки оптимума состава стали, что позволило получить максимальную надежность исследуемой системы (рис. 3). Однако оптимизированная модель имеет ряд недостатков, выраженных в диапазонах содержания элементов состава стали. Полученные точки оптимума для углерода (1,4 % C) и кремния (1,02 % Si) не имеют близлежащих точек, контактных или приближенных к отметке значимости 1,0. Диапазон содержания марганца близок к исследуемому общему диапазону и составляет 12,4–18,0 %, являясь достаточно широким и требующим дополнительного уточнения (сужения). Полученные содержания хрома в пределах 0,37–0,5 %, а также никеля и молибдена в пределах 0,1–0,5 % приемлемы для практического применения.

Для уточнения интервалов содержания компонентов выполнен расчет и анализ контурного графика поверхности отклика. Попарный анализ представлен на всем исследуемом промежутке долей элементов и позволяет с достаточной точностью скорректировать интервалы (рис. 4).

Взаимосвязь элементов отображена на линейном графике пересечения областей с наибольшей значимостью влияния (рис. 5). Анализ исследуемого диапазона по содержанию углерода показал, что наибольшее влияние имеет пара C – Mn с концентрациями 0,9–1,4 % и 12,5–17,0 % соответственно. Область парного влияния C – Si можно рассценивать как значимую для 0,95–1,15 % C и 0,5–0,8 % Si. Пара C – Ni оказывает наибольшую значимость для содержания 1,2–1,4 % C при 0,2–0,4 % Ni. При этом пара C – Mo является наиболее значимой для формирования свойств при 1,3–1,4 % C и 0,1–0,5 % Mo. Связь C – Cr не показывает обширных и значимых областей влияния.

Большое значение имеет исследование эффективных диапазонов содержания марганца. Так, для связки Mn – Si стоит выделить область 12,5–16,0 % и 0,9–1,1 % Si. Модель совместного влияния Mn – Cr не показала областей связи данных элементов на формирование ударной вязкости, однако поверхность отклика пары Mn – Ni стоит считать весьма обширной: 12,5–18,0 % Mn при 0,1–0,5 % Ni. Широкая зона также наблюдается для пары Mn – Mo: 12,5–17,0 % Mn и 0,1–0,4 % Mo.

Кроме проанализированных моделей парных взаимосвязей для C – Si и Mn – Si, следует отметить область в диапазоне содержания 0,5–1,1 % Si при достаточно стабильной концентрации 0,2 % Cr. Поверхность отклика взаимосвязи

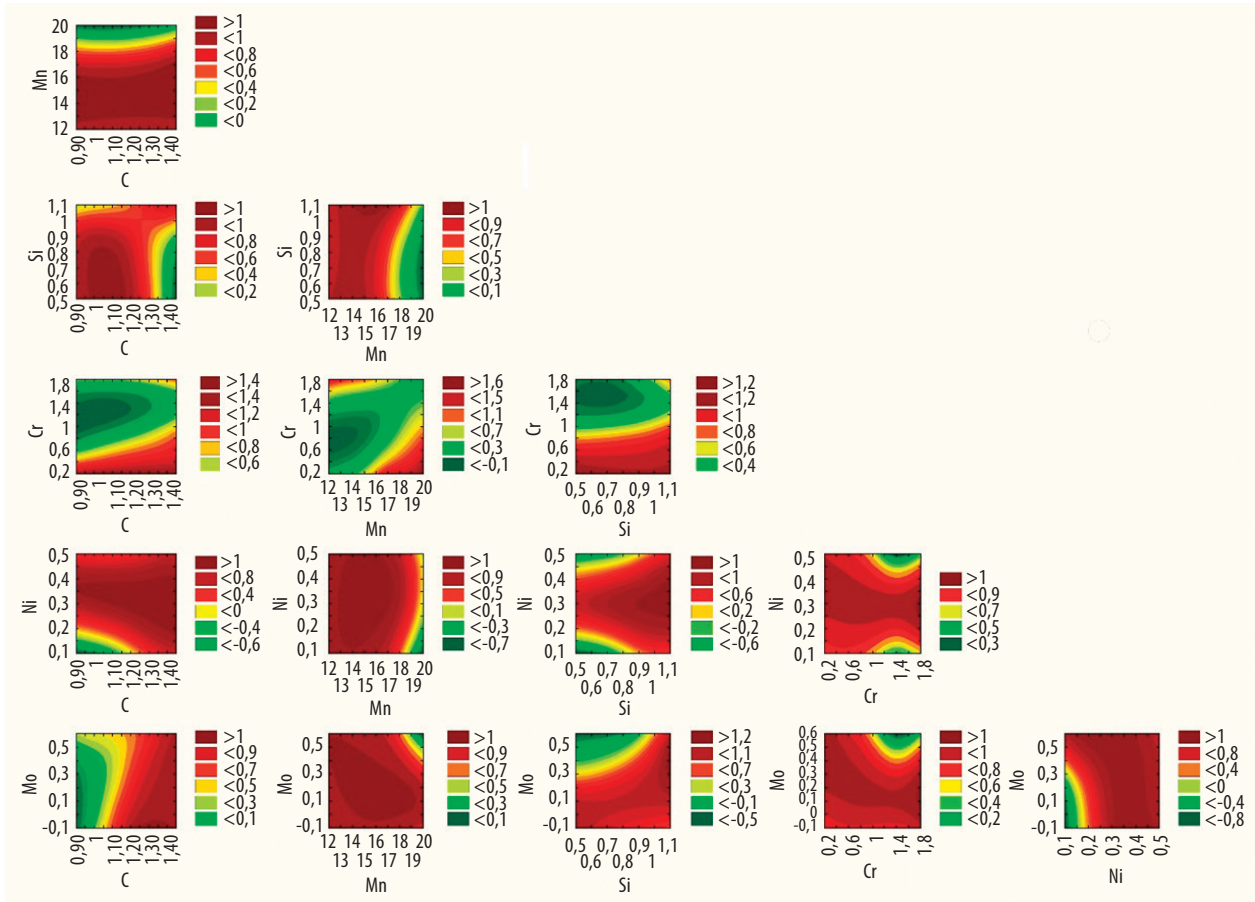


Рис. 4. Поверхностный отклик оптимизированной модели

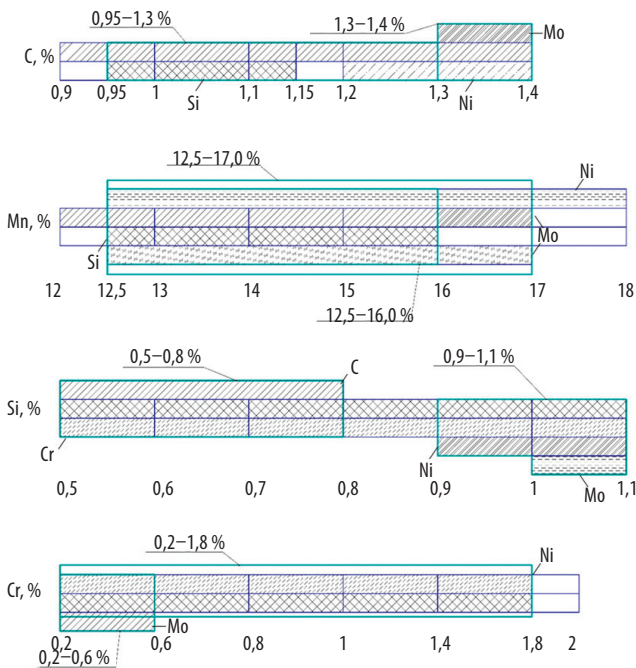


Рис. 5. Области пересечения оптимальных диапазонов попарного анализа

Si – Ni определяет концентрацию 0,9–1,1 % Si при 0,25–0,4 % Ni. Несмотря на обширную область связи Si – Mo, модель прогнозирует диапазон 1,0–1,1 % Si при содержании 0,1–0,4 % Mo.

Среди связей легирующих элементов содержание хрома остается значимым при концентрации в диапазоне 0,2–1,8 % Cr для 0,2–0,35 % Ni и 0,1–0,2 % Mo. Рассматривая отдельно влияние молибдена и никеля на формирование ударной вязкости, стоит выделить диапазон концентраций молибдена и никеля в пределах 0,1–0,5 %.

Таким образом, сформированы два экспериментальных состава стали Гадфильда, на основе которых в дальнейшем были проведены дополнительные выплавки с аналогичной подготовкой образцов. Сравнение фактического химического состава и уровня механических свойств экспериментальных сталей (составы 1, 2) со стандартной маркой 110Г13Л (состав 3) представлено в табл. 3.

По результатам исследования дополнительных образцов предлагаемые составы обладают удовлетворительной величиной ударной вязкости, соответствующей целевому диапазону модели (25–30 кгс·м/см²). Уровни механических свойств также превышают соответствующие значения стандартной стали. При этом результаты анализа микроструктуры располагаются в зависимости от балла аустенитного зерна следующим образом (рис. 6): сталь 110Г13Л — балл 1–2; состав 1 — балл 3; состав 2 — балл 5–6.

Повышенные концентрации Cr, Mo и Ni в образце состава 2 оказали благоприятное воздействие на формирование стабильной структуры аустенита, создав дополнительные центры кристаллизации и препятствуя росту зерна. Это послужило основой формирования мелкозернистой структуры,

Таблица 3


Результаты сравнительного анализа образцов

Номер состава	Химический состав, %									KCU, кгс-м/см ²
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P	Fe	
1	1,27	12,80	0,92	0,24	0,11	0,14	0,012	0,043	Ост.	26,4
2	1,13	16,35	0,81	1,28	0,35	0,16	0,010	0,032	То же	28,3
3	1,08	12,99	0,58	0,11	0,06	0,02	0,010	0,041	То же	23,4

которая является наиболее перспективной для устойчивого мартенситного превращения, позволяющего осуществить направленное изменение свойств при помощи термической и механической обработки. Именно полученная структура, обладающая меньшим сечением межзеренных границ и содержащая высокотвердые карбиды, позволяет материалу сопротивляться воздействию абразивных частиц и дает возможность последующего упрочнения посредством реализации механизма двойникования. Как отмечено авторами работы [27], двойниковые границы в подобных случаях являются восприимчивыми к внешним воздействиям и обеспечивают многократную перестройку кристаллической решетки без заметных признаков усталостного разрушения, что влияет на уровень механических и эксплуатационных свойств стали.

Заключение

Применение современных программных продуктов компьютерного моделирования и статистической обработки результатов позволило повысить качество подготовки образцов и подобрать оптимальный химический состав в заданном диапазоне значений ударной вязкости. Представленные результаты, а именно повышенные (относительно стали Гадфильда) значения твердости по Бринеллю и ударной вязкости, позволяют судить о перспективности дальнейшего исследования и промышленного использования предлагаемого состава 2: Fe – 1,1C – 16Mn – 0,8Si – 1,3Cr – Ni – Mo.

Микроструктура образца предлагаемого состава содержит упрочняющую карбидную сетку. Учитывая содержание карбидообразующих, тугоплавких элементов (Cr, Mo, Ni), которыми дополнительно легирован базовый состав металла, можно предположить, что данные карбиды, находясь в аустенитной матрице, окажутся препятствием для воздействия абразива и распространения износа отливок. Сравнительный анализ технологических и эксплуатационных свойств отливок из сталей 110Г13Л и Fe – 1,1C – 16Mn – 0,8Si – 1,3Cr – Ni – Mo является следующим этапом развития исследований. 

Работа выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2020-0013.

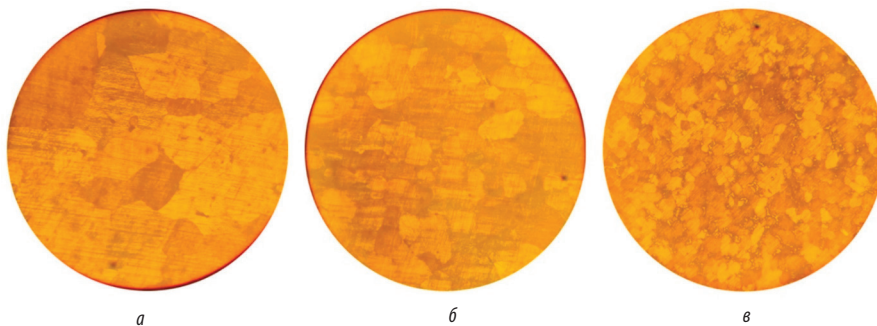


Рис. 6. Микроструктура образцов из стали 110Г13Л (а) и составов 1 (б) и 2 (в), $\times 100$

Библиографический список

1. Lencinaa R., Caletta C., Brunellib K., Miconea R. Assessing wear performance of two high-carbon Hadfield steels through field tests in the mining industry // *Procedia Materials Science*. 2015. No. 9. P. 358–366.
2. Колокольцев В. М., Вдовин К. Н., Черепанов В. П., Феоктистов Н. А., Горленко Д. А., Дубровин В. К. Исследование механизмов абразивного и ударно-абразивного изнашивания высокомарганцевой стали // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2017. Т. 15. № 2. С. 54–62.
3. Vdovin K., Pesin A., Feoktistov N., Gorlenko D. Surface wear in hadfield steel castings DOPED with nitrided vanadium // *Metals*. 2018. No. 8. P. 845. DOI: 10.3390/met8100845.
4. Varela L. B., Tressia G., Masoumi M., Bortoleto E. M., Regattieri C., Sinatora A. Roller crushers in iron mining, how does the degradation of Hadfield steel components occur? // *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 122. P. 105295. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105295.
5. Lindroosa M., Cailletaudb G., Laukkanena A., Kuokkalac V. Crystal plasticity modeling and characterization of the deformation twinning and strain hardening in Hadfield steels // *Materials Science & Engineering A*. 2018. Vol. 720. P. 145–159. DOI: 10.1016/j.msea.2018.02.028.
6. Chen C., Lv B., Ma H., Sun D., Zhang F. Wear behavior and the corresponding work hardening characteristics of Hadfield steel // *Tribology International*. 2018. Vol. 121. P. 389–399. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.044.
7. Алимов В. И., Штыжно А. П., Баурова И. И. Совершенствование производства деталей из стали 110Г13Л для дробильно-размольного оборудования // *Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении*. 2021. № 3. С. 50–60.
8. Abbasi M., Kheirandish S., Kharrazi Y., Hejazi J. On the comparison of the abrasive wear behavior of aluminum alloyed and standard Hadfield steels // *Wear*. 2010. Vol. 268. No. 1-2. P. 202–207. DOI: 10.1016/j.wear.2009.07.010.
9. Zhang G.-S., Xing J.-D., Gao Y.-M. Impact wear resistance of WC/Hadfield steel composite and its interfacial characteristics // *Wear*. 2006. Vol. 260, No. 7-8. P. 728–734. DOI: 10.1016/j.wear.2005.04.010.
10. Горленко Д. А., Михалкина И. В., Феоктистов Н. А. Влияние легирования феррохромом на химический состав и морфологию карбидной фазы стали Гадфильда // *Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки*. 2020. № 19. С. 101–106.
11. Чайкин А. В., Чайкин В. А., Лозов В. С., Касимгазинов А. Д., Карман Ю. В., Быков П. О. Сравнительный анализ качественных показателей стали 110Г13Л, выплавленной с применением различных модификаторов и раскислительных смесей // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2018. Т. 16. № 1. С. 19–25. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-1-19-25.
12. Pu J., Li Z., Hu Q., Wang Y. Effect of heat treatment on microstructure and wear resistance of high manganese steel surfacing layer // *International*

- Journal of Modern Physics B. 2019. Vol. 33. No. 01-03. P. 1940035. DOI: 10.1142/S0217979219400356.
13. ГОСТ 4755–91. Ферромарганец. Технические требования и условия поставки. — Введ. 01.01.1997.
 14. ГОСТ 6008–90. Марганец металлический и марганец азотированный. Технические условия. — Введ. 01.07.1991.
 15. ГОСТ 4759–91. Ферромолибден. Технические требования и условия поставки. — Введ. 01.01.1993.
 16. ГОСТ 4757–91. Феррохром. Технические требования и условия поставки. — Введ. 01.01.1993.
 17. ГОСТ 849–2018. Никель первичный. Технические условия. — Введ. 01.06.2019.
 18. ГОСТ 1415–93. Ферросилиций. Технические требования и условия поставки. — Введ. 01.01.1997.
 19. ГОСТ 295–98. Алюминий для раскисления, производства ферросплавов и алюминотермии. — Введ. 01.07.2001.
 20. Система компьютерного моделирования литейных процессов «ПолигонСофт». URL: <http://www.poligonsoft.ru/poligonsoft/> (дата обращения : 28.06.2022).
 21. Груничев А. В., Павлов Д. В., Подъемщиков А. Н., Хмелев Р. Н. Исследование заключительных этапов технологического процесса получения отливок цилиндров дизелей методом вычислительного эксперимента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 5. С. 305–312.
 22. ГОСТ Р 54153–2010. Сталь. Метод атомно-эмиссионного спектрального анализа. — Введ. 01.01.2012.
 23. ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. — Введ. 01.01.1979.
 24. ГОСТ 9012–59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. — Введ. 01.01.1960.
 25. Marinkovic V. Some applications of a novel desirability function in simultaneous optimization of multiple responses // FME Transactions. 2021. Vol. 49. No. 3. P. 534–548. DOI: 10.5937/fme2103534M.
 26. Yi Z., Liu Q., Qin J. Optimization of Sintering Strength Based on Response Surface Methodology // Trans Indian Inst Met. 2021. Vol. 74. P. 3085–3092. DOI: 10.1007/s12666-021-02384-6.
 27. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Пластификация и упрочнение металлических кристаллов при механическом двойниковании. — Минск : Технопринт, 2001. — 218 с.

"Chernye metally", 2022, No. 10, pp. 45–51
DOI: 10.17580/chm.2022.10.08

Digital experiment as a method for improving the mechanical properties of Hadfield steel

Information about authors

S. L. Arapov, Chief Metallurgist¹, e-mail: arapovsl@yandex.ru;
S. V. Belyaev, Dr. Eng., Prof.², e-mail: 244812@mail.ru;
A. A. Kosovich, Cand. Eng., Senior Researcher², e-mail: akosovich@sfu-kras.ru;
E. G. Partyko, Junior Researcher², e-mail: eliforion@mail.ru
¹ Engineering Construction Maintenance Ltd., Achinsk, Russia.
² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Abstract: This study is devoted to determining the optimal composition of high-manganese austenitic Hadfield steel for producing castings with increased impact strength and hardness relative to the standard grade. The chemical composition of the steel was modified in terms of expanding the range of Mn content (12–19 %). The effect of combined doping with a complex of elements Cr, Mo, Ni is considered. Preliminary computer modeling and porosity analysis of the cast billets was carried out to determine the place of cutout of representative samples needed to evaluate the actual chemical composition and mechanical properties. Statistical analysis of the obtained results on the content of elements and impact strength of the samples was performed using the desirability function. Further optimization of the model was carried out using the response surface methodology. Based on the analysis of pairwise interactions, two experimental compositions of the Hadfield steel are proposed. A comparison of grade 110G13L with the proposed compositions based on the level of mechanical properties and grain score by microstructure is given. It is concluded that it is promising to further use the proposed Fe–1.1C–16Mn–0.8Si–1.3Cr–Ni–Mo composition, which can improve the reliability of castings operating under conditions of significant wear.

Key words: Hadfield steel; austenite; impact hardness; chemical composition; alloying; PoligonSoft; desirability function; response surface methodology.

The work was carried out within the framework of the state task for science of the Siberian Federal University, project number FSZR-2020-0013.

References

1. Lencinaa R., Caletta C., Brunellib K., Miconea R. Assessing wear performance of two high-carbon Hadfield steels through field tests in the mining industry. *Procedia Materials Science*. 2015. No 9. pp. 358–366.
2. Kolokoltsev V. M., Vdovin K. N., Cherepanov V. P., Feoktistov N. A., Gorlenko D. A., Dubrovin V. K. Study of the mechanisms of abrasive and shock-abrasive wear of high-manganese steel. *Vestnik MGTU imeni G. I. Nosova*. 2017. Vol. 15. No. 2. pp. 54–62.
3. Vdovin K., Pesin A., Feoktistov N., Gorlenko D. Surface wear in hadfield steel castings DOPED with nitrided vanadium. *Metals*. 2018. No. 8. p. 845.
4. Varela L. B., Tressia G., Masoumi M., Bortoleto E. M., Regattieri C., Sinatora A. Roller crushers in iron mining, how does the degradation of Hadfield steel components occur? *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 122. p. 105295.
5. Lindroosa M., Cailletaudb G., Laukkanena A., Kuokkalac V. Crystal plasticity modeling and characterization of the deformation twinning and strain hardening in Hadfield steels. *Materials Science & Engineering A*. 2018. Vol. 720. pp. 145–159.
6. Chen C., Lv B., Ma H., Sun D., Zhang F. Wear behavior and the corresponding work hardening characteristics of Hadfield steel. *Tribology International*. 2018. Vol. 121. pp. 389–399.
7. Alimov V. I., Shtykhno A. P., Bairova I. I. Improvement of the production of parts from 110G13L steel for crushing and grinding equipment. *Resursosberegayushchie tekhnologii proizvodstva i obrabotki davleniem materialov v mashinostroenii*. 2021. No. 3. pp. 50–60.
8. Abbasi M., Kheirandish S., Kharrazi Y., Hejazi J. On the comparison of the abrasive wear behavior of aluminum alloyed and standard Hadfield steels. *Wear*. 2010. Vol. 268. No. 1–2. pp. 202–207.
9. Zhang G.-S., Xing J.-D., Gao Y.-M. Impact wear resistance of WC/Hadfield steel composite and its interfacial characteristics. *Wear*. 2006. Vol. 260. No. 7–8. pp. 728–734.
10. Gorlenko D. A., Mikhalkina I. V., Feoktistov N. A. Effect of alloying with ferrochromium on the chemical composition and morphology of the carbide phase of Hadfield steel. *Tekhnologii metallurgii, mashinostroeniya i materialoobrabotki*. 2020. No. 19. pp. 101–106.
11. Chaykin A. V., Chaykin V. A., Lozov V. S., Kasimgazinov A. D., Karman Yu. V., Bykov P. O. Comparative analysis of quality indicators of 110G13L steel smelted using various modifiers and deoxidizing mixtures. *Vestnik MGTU imeni G. I. Nosova*. 2018. Vol. 16. No. 1. pp. 19–25.
12. Pu J., Li Z., Hu Q., Wang Y. Effect of heat treatment on microstructure and wear resistance of high manganese steel surfacing layer. *International Journal of Modern Physics B*. 2019. Vol. 33. No. 01-03. p. 1940035.
13. ГОСТ 4755–91. Ферромарганец. Спецификация и условия поставки. Введен: 01.01.1997.
14. ГОСТ 6008–90. Металлический марганец и нитрированный марганец. Спецификации. Введен: 01.07.1991.
15. ГОСТ 4759–91. Ферромолибден. Спецификация и условия поставки. Введен: 01.01.1993.
16. ГОСТ 4757–91. Феррохром. Спецификация и условия поставки. Введен: 01.01.1993.
17. ГОСТ 849–2018. Первичный никель. Спецификации. Введен: 01.06.2019.
18. ГОСТ 1415–93. Ферросилиций. Спецификация и условия поставки. Введен: 01.01.1997.
19. ГОСТ 295–98. Алюминий для раскисления, производства ферросплавов и алюминотермии. Введен: 01.07.2001.
20. "PolygonSoft" computer modeling system for foundry processes. Available at: <http://www.poligonsoft.ru/poligonsoft/> (accessed: 28.06.2022).
21. Grunichev A. V., Pavlov D. V., Podyemshchikov A. N., Khmelev R. N. Study of the final stages of the technological process for obtaining diesel cylinder castings by the computational experiment method. *Tekhnicheskie nauki*. 2020. No. 5. pp. 305–312.
22. ГОСТ Р 54153–2010. Сталь. Метод атомно-эмиссионного спектрального анализа. Введен: 01.01.2012.
23. ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. Введен: 01.01.1979.
24. ГОСТ 9012–59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. Введен: 01.01.1960.
25. Marinkovic V. Some applications of a novel desirability function in simultaneous optimization of multiple responses. *FME Transactions*. 2021. Vol. 49. No. 3. pp. 534–548.
26. Yi Z., Liu Q., Qin J. Optimization of Sintering Strength Based on Response Surface Methodology. *Trans Indian Inst. Met.* 2021. Vol. 74. pp. 3085–3092.
27. Bashmakov V. I., Chikova T. S. Plasticization and hardening of metal crystals during mechanical twinning. *Minsk: Tekhnoprint*, 2001. 218 p.