

УДК 669.295-004.8

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ СТАЛИ 23Г2А
ПОСЛЕ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫМИ
ТИТАНСОДЕРЖАЩИМИ ДОБАВКАМИ**

Н. Н. Федоркова

Национальная металлургическая академия Украины

Введение. Наряду с проблемой рациональной переработки титановых отходов и нахождения путей их использования, одной из основных задач черной металлургии является повышение качества сталей и сплавов, получение гарантированных стабильных свойств [1; 2]. Под научным руководством д-ра техн. наук, профессора О. М. Шаповаловой разработана комплексная технологическая добавка из отходов титана и алюминия взамен ферротитана ФТи68 для внепечной обработки в ковше качественных марганцовистых сталей. Применение такой титансодержащей добавки, с одной стороны, позволит рационально использовать отходы титана и алюминия, а с другой – способствовать повышению качества сталей в результате комплексной внепечной обработки расплава в ковше для повышения общего уровня свойств сталей.

Широкое применение получили низколегированные стали благодаря сочетанию значительной прочности и пластичности с высокими эксплуатационными характеристиками. Марганцовистые стали обладают отличным комплексом свойств: прочностью в сочетании с пластичностью и ударной вязкостью, коррозионной стойкостью, свариваемостью и деформируемостью. Это создало широкую сферу применения марганцовистых сталей в отечественной промышленности, особенно в судостроении, для нефтепроводов, изготовления ответственных деталей машин. Среди марганцовистых выделяется сталь марки 23Г2А, применяемая для изготовления цепей морских судов, различных деталей автомобиле- и приборостроения.

Обзор литературы. Одним из наиболее простых и экономичных способов повышения качества сталей и сплавов является их внепечная обработка различными раскислителями, в том числе ферротитаном марки ФТи68 и другими титансодержащими добавками. Положительным свойством титана является в том числе и его способность измельчать зерно, особенно при введении в инструментальную сталь, ограничивать глубину закалки, уменьшать трещинообразование при закалке. Он принадлежит к числу наиболее сильных упрочнителей феррита. В сталях, нормализованных при температуре 870–925 °С, небольшие добавки титана, измельчая зерно, повышают предел текучести, но снижают ударную вязкость [3].

Титан повышает высокотемпературную прочность малоуглеродистой стали, частично или полностью устраняет ликвацию, повышает сопротивляемость стали деформационному старению. По мнению автора [4], в раскисленной титаном стали его количество не должно превышать 0,025 %, в противном случае образуется двуокись титана (рутил). По мнению авторов [5], размер зерна аустенита и перлитных колоний не изменяется при введении в них титана, кроме того, авторы считают, что ванадий и титан увеличивают межпластиночное расстояние и толщину пластин

цементита. Однако в работе [6] приведены результаты исследований влияния микродобавок титана и бора на марганцовистую сталь, из которых следует, что при содержании 0,026 % титан снижает размер действительного зерна на 1 балл.

Столь противоречивые и неоднозначные данные требуют дополнительных исследований, например, по влиянию титана на количество и размер областей перлита, зерен феррита, параметры тонкой структуры [5; 6]. Кроме того, в литературе не указан нижний предел содержания микродобавок титана, который оказывает сильное облагораживающее действие на сталь [7; 8].

Оптимальное содержание титана естественно должно быть связано с содержанием углерода в стали. Оно должно изменяться от малоуглеродистой к средне- и высокоуглеродистой сталям. Во многих работах определен состав неметаллических включений в титансодержащих сталях, однако авторы не установили зависимость механических свойств стали от их количества и фазового состава [9]. При содержании титана более 0,025 % он рассматривается как легирующий компонент сплава, способный изменять свойства твердых растворов и упрочняющих фаз.

Эффективность использования титана при введении его в стали и чугуны зависит от их состава и типа титансодержащего материала для обработки расплава. Изменяя соотношение титана и углерода и общее количество вводимого титана, можно добиться значительного снижения остаточного содержания газов в стали (в первую очередь азота).

Как показано в данной работе, обработка стали титаном резко (в 5–10 раз) уменьшает в ней содержание растворимого азота. Это существенно повышает качество малоуглеродистых сталей за счет подавления отрицательного эффекта от деформационного старения.

В таблице 1 приведен химический состав стали 23Г2А после обработки ферротитаном марки ФТи68 и комплексной технологической добавкой ДТ1.

Таблица 1

Средние значения содержания химических элементов в стали 23Г2А

Вид добавки	Содержание химических элементов в стали, % масс.							
	C	Mn	Si	S	P	Cr	N	Ti
							не более	
ТУ 14–1–125875, ТУ 14–1–3596–83	0,21–0,27	1,4–1,7	0,17–0,37	0,025	0,025	0,25	0,25	0,03
ФТи68	0,24	1,54	0,26	0,01	0,01	–	0,006	0,0058
ДТ1	0,23	1,55	0,28	0,02	0,01	0,032	–	0,0139

Цель работы заключалась в повышении качества низколегированной марганцовистой стали 23Г2А и проведении сравнительных исследований ее химического состава и механических свойств после обработки ферротитаном и введения в расплав микродобавок титана в составе технологической добавки многофункционального назначения ДТ1 [10].

Результаты работы и их обсуждение. Для сравнительной оценки усвояемости титана расплавом стали были проанализированы 150 плавок с обработкой ферротитаном и 150 плавок с обработкой ДТ1. В результате проведенного анализа построены частотные графики и кривые распределения содержания титана в стали (рис. 1).

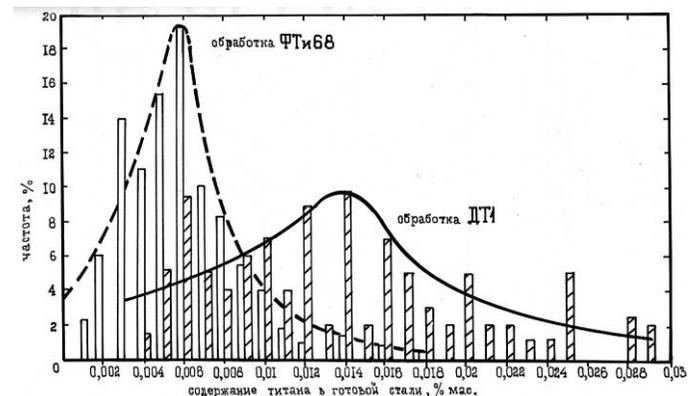


Рис. 1. Частотные графики распределения содержания титана в готовой стали 23Г2А после обработки различными титан содержащими добавками.

Из данных графиков видно, что титан усваивался после обработки добавкой ДТ1 в значительно большей степени (в 1,5–2,0 раза), чем после обработки ферротитаном. Содержание титана в стали изменялось в пределах 0,004–0,029 % против 0,001–0,018 % после обработки ФТи68.

Выявлена зависимость усвоения титана от содержания углерода в расплаве стали перед выпуском его из конвертера в ковш.

С помощью ЭВМ методами корреляционно-регрессионного анализа проведена обработка статистических данных с математическим описанием зависимости усвоения титана в готовой стали от содержания углерода в расплаве после продувки по линейной модели методом наименьших квадратов [11]. Исходные данные и полученная зависимость приведены на рисунке 2. В результате расчетов определена модель и следующая зависимость:

$$Y = f(X) \quad [Ti] = 0,0066 + 0,063 [C].$$

Таким образом, титан добавки усваивался тем хуже, чем меньше углерода оставалось в расплаве после продувки. Титан обладает большим сродством к углероду по сравнению с кислородом, поэтому в расплаве он действует как геттер: больше углерода в расплаве стали – больше титана им усваивается (рис. 2).

Можно было ожидать, что аналогичный эффект будет проявляться при взаимодействии с азотом. Однако проведенный анализ не подтвердил этого. Не обнаружен повышенный азот и в литых пробах стали 23Г2А, взятых по окончании продувки ее кислородом. Оказалось, что расплав стали наиболее активно насыщается азотом при заливке и кристаллизации стали в изложнице. Этим объясняется слабо выраженное взаимодействие титана и азота на стадии выпечной обработки в ковше.

Кроме того, титан имеет значительное сродство к кислороду, но меньше, чем алюминий, поэтому предварительная перед введением титансодержащей добавки обработка расплава чушковым алюминием и алюминием самой технологической добавки продлевает во времени действие титана как раскислителя.

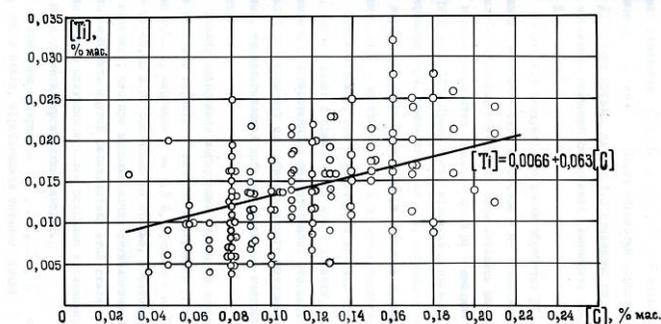


Рис. 2. Зависимость содержания титана в готовой стали от содержания углерода в расплаве перед его выпуском из конвертера.

С помощью ЭВМ была сделана оценка усвоения основных легирующих элементов – С, Mn, Si, Ti и содержания вредных примесей S и P после обработки ФТн68 и ДТ1 в 70 плавках. На рисунке 3 приведена полученная гистограмма наиболее вероятных значений содержания химических элементов в стали (в % масс).

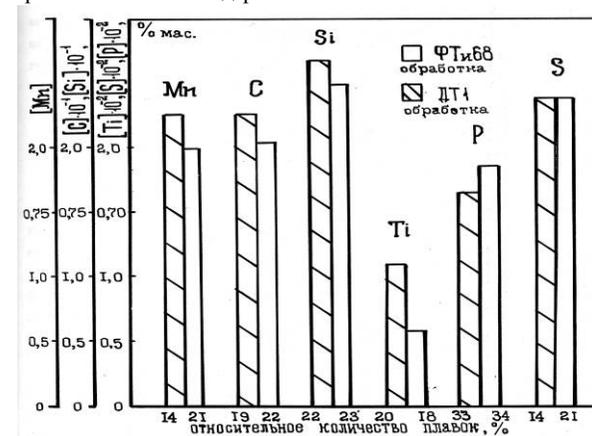


Рис. 3. Гистограмма наиболее вероятных значений содержания легирующих элементов и вредных примесей в стали 23Г2А после обработки различными титансодержащими добавками.

Из данного рисунка следует, что после обработки ДТ1 содержание вредных примесей – серы и фосфора – не увеличилось. Наиболее вероятные значения

содержания серы остались на том же уровне, а фосфора снизились на 9 % с 0,019 до 0,017 после обработки ДТ1. Кроме того, количество плавок, имеющих данное содержание серы, уменьшилось на 7%, количество плавок с наиболее вероятными значениями фосфора осталось примерно на одном уровне: 34 % – по старой и 33 % по новой технологии.

Следовательно, общее количество вредных примесей в плавках, выполненных с применением добавки ДТ1, уменьшилось по сравнению с обработанными ферротитаном. Это подтвердило факт высокой раскисляющей способности добавки ДТ1.

Анализ содержания легирующих элементов показал, что уровень наиболее вероятных значений содержания углерода повысился на 6,52 %, марганца – на 7,3 %, кремния – на 7,41 % и титана – на 45,45 % по сравнению со сталью, обработанной ФТи68. Это значит, что при использовании ДТ1 можно экономить другой раскислитель этой стали – алюминий.

Повышение содержания С, Мп, Si, Ti объясняется тем, что в стали, обработанной титаном, точка S диаграммы состояния Fe–C сдвигается в сторону уменьшения содержания углерода. Кроме того, марганец и кремний легируют феррит, растворяясь в кристаллической решетке α -железа. Марганец и титан относятся к сильным карбидообразующим элементам, поэтому в стали образуются карбиды типа (Fe, Мп)₃C. Все перечисленные факторы способствуют более высокому усвоению легирующих элементов расплавом стали при ее внепечной обработке технологической добавкой ДТ1.

Результативность применения титана в черной металлургии почти всецело обусловлена его способностью образовывать устойчивые соединения с различными примесями, главным образом с кислородом, азотом и углеродом (табл. 2).

Таблица 2
Равновесные концентрации кислорода в жидкой стали с остаточным содержанием 0,1% раскислителя при T = 1600 °C

Раскислитель	Продукт раскислительной реакции	Равновесная концентрация O ₂	Раскислитель	Продукт раскислительной реакции	Равновесная концентрация O ₂
C	Co	0,030	Ti	TiO ₂	0,005
Si	SiO ₂	0,018	Al	Al ₂ O ₃	0,0015
V	V ₂ O ₃	0,012	Al	(FeO)Al ₂ O ₃	0,007
V	FeV ₂ O ₄	0,045			

Из таблицы видно, что алюминий по раскислительной способности превосходит титан, однако качество раскисляемой стали более существенно повышается под влиянием титана, так как его добавки увеличивают легкоплавкость неметаллических включений в стали, способствуют их конгломерированию, всплыванию на поверхность расплавленного металла и его дополнительному

очищено. Кроме того, повышается жидкотекучесть шлаков (смеси двуокиси титана и обычных для стали включений).

Алюминий же восстанавливает силикаты в стали, образуя тугоплавкий глинозем, он трудно конгломерируется и, кроме того, имеет склонность к образованию в стали строчечных выделений, что снижает качество металла.

В таблице 3 приведены средние значения механических характеристик стали 23Г2А, обработанной разными добавками в сравнении со свойствами, требуемыми по ТУ.

Таблица 3

Средние значения механических характеристик стали 23Г2А после обработки разными титансодержащими добавками и требования по ГОСТ

Вид титансодержащей добавки	Средние значения механических характеристик					
	предел текучести, σ_T , МПа	предел прочности, σ_B , МПа	относит. удлинение, δ , %	относит. сужение, ψ , %	ударная вязкость, КСУ, МДж/м ²	твердость по Бринеллю, НВ, МПа
	не менее					не более
ТУ 14-1-1258-75	950	1050	12,0	50,0	0,7	–
ТУ 14-01-3596-83	930	1050	8,0	40,0	–	1790
ФТи68	1118,2	1187,21	12,87	57,13	1,1067	1496,43
ДТ1	1070,35	1139,28	13,07	59,32	1,3052	1567,64

Результаты анализа механических свойств стали 23Г2А после обработки ФТи68 и ДТ1 показаны на рисунке 4, где уровень требования ТУ ограничен заштрихованной областью, а пунктиром показаны области данных, полученных после обработки ДТ1.

Из рисунков следует, что общий уровень свойств в стали повысился после обработки ДТ1 в том числе и за счет повышения стабильности значений механических характеристик.

Это подтвердило применение планиметрического метода оценки площади, занятой точками на графике (системы σ_B - δ). Кроме того, интервал значений относительного сужения в опытных плавках сместился в сторону увеличения уровня данной характеристики, что свидетельствует об увеличении пластичности металла (рис. 4 б). Аналогичное явление наблюдается и в системе σ_B -КСУ (рис. 4 в), то есть повысился уровень ударной вязкости в стали после обработки ДТ1.

Очевидно, что наибольшее влияние как раскислитель, модификатор и микролегирующая добавка оказывала добавка ДТ1 на ударную вязкость и относительное сужение исследуемого металла. Значения твердости по Бринеллю изменялись в пределах 1280–1790 МПа после обработки ФТи68 и 13400–1790 МПа после обработки ДТ1.

Для всех механических характеристик найдены средние значения. На рисунке 5 приведены гистограммы, где показано некоторое снижение средних значений прочностных характеристик (σ_B и HV), повышение пластичности (δ и ψ) и ударной вязкости КСЧ. Следовательно, произошло повышение общего уровня механических свойств стали после обработки ДТ1 по сравнению со сталью, раскисленной ферротитаном.

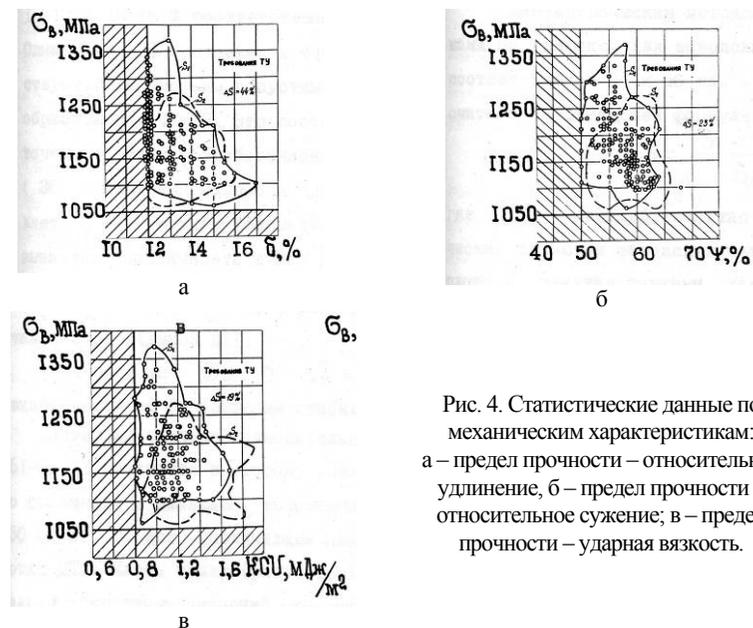


Рис. 4. Статистические данные по механическим характеристикам: а – предел прочности – относительное удлинение, б – предел прочности – относительное сужение; в – предел прочности – ударная вязкость.

Из данных рисунков следует, что значения прочности в плавках с ДТ1 снизились на 6,3 % для σ_T и 6,8 % для σ_B по сравнению с обычной сталью. В то же время количество плавков с этими значениями прочности увеличилось: для предела текучести на 6 и для предела прочности – на 7 %. Это подтверждает факт повышения стабильности свойств стали 23Г2А. Уровень наиболее вероятных значений относительного удлинения увеличился незначительно – на 3,2 %, а количество плавков с данным значением снизилось на 2 % по сравнению с опытным металлом.

Уровень наиболее вероятных значений относительного сужения в стали с ДТ1 повысился на 5,09 %, также увеличилось на 3 % и количество плавков, соответствующих этим значениям. Уровень ударной вязкости в опытных плавках повысился на 33,79 %, а количество плавков с такими значениями – на 2 %.

Кроме того, сделана оценка влияния титана на механические свойства стали 23Г2А. Для этого все исследуемые плавки разбивали на 5 групп по содержанию титана. В каждой группе определяли среднее значение для предела прочности и

относительного сужения. Результаты оценки влияния титана на механические свойства приведены на рисунке 6.

Как следует из данных рисунков, с увеличением содержания титана в металле предел прочности и относительное сужение стали увеличиваются.

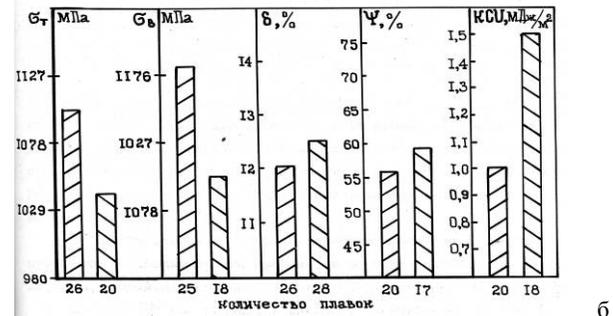
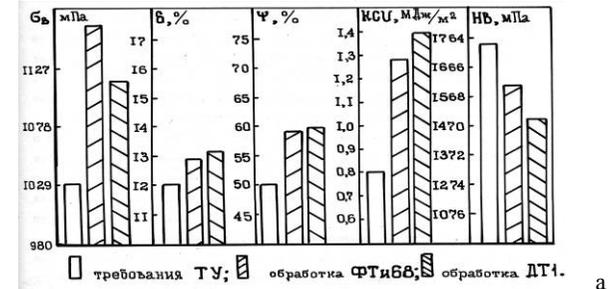


Рис. 5. Гистограммы средних (а) и наиболее вероятных (б) значений механических характеристик стали 23Г2А.

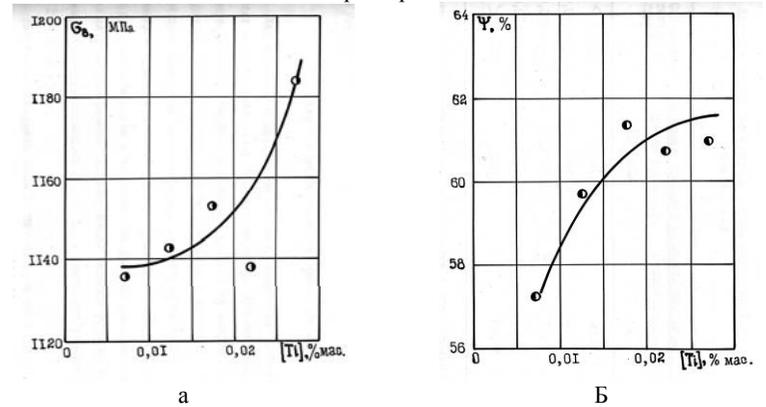


Рис. 6. Влияние титана на механические свойства стали 23Г2А, обработанной добавкой ДТ1.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлен эффект взаимодействия титана добавки ДТ1 с углеродом. Получена аналитическая форма линейной зависимости содержания титана от количества углерода в стали. Титан проявил себя модификатором первого и второго рода при взаимодействии с углеродом и далее с азотом, а также раскислителем, соединяясь с остаточным кислородом в оксиды на стадии наиболее глубокой очистки его после предварительного раскисления алюминием. Повысился уровень наиболее вероятных значений содержания углерода, марганца, кремния и титана, снизился уровень содержания фосфора и серы.

Достигнуто повышение стабильности и уровня ударной вязкости на 23 %, относительного сужения на 8 %, относительного удлинения – на 3 % при незначительном снижении прочностных характеристик в результате замены дорогостоящего ферротитана ФТи68 комплексной технологической добавкой ДТ1.

Литература

1. Шаповалова О. М. Рациональные способы переработки титановых отходов / Состояние и пути улучшения использования отходов титановых сплавов: Тезисы докладов научно-технического совещания. – 1985. – г. Верхняя Салда. – 31 с.
2. Улучшение свойств титановых сплавов и сталей и проблема использования титановых отходов: Сб. научн. тр. / ДГУ. Научн. руковод.: Шаповалова О. М. – Дн-ск, 1982. – 220 с.
3. Поволоцкий Д. Я., Токовой О. К., Абезгауз М. В. Улучшение качества конвертерной кипящей стали // Сталь, 1988. – № 1. – С. 25–26.
4. Исследование фазового состава стали, микролегированной титаном и азотом, и влияние на него температуры и деформации / Мирошниченко А. В., Киржнер О. М., Захарченко Л. Н. и др. // УкрНИИмет. Харьков, 1987. // Деп. в Черметинформации. – 30.04.87, № 3975.
5. Влияние параметров структуры и неметаллических включений на ударную вязкость рельсовой стали / Э. Л. Колосова, В. И. Сырейщикова и др. УралНИИЧМ, Нижнетагильский металлургический комбинат // МИТОМ, № 10, 1988. – С. 40–42.
6. Влияние комплексного микролегирования титаном и бором на структуру и свойства стали 14Г2 / В. В. Щиголев, Г. С. Ершов и др. // МиТОМ, № 9, 1988. – С. 23–25.
7. Исследование влияния микродобавок ниобия, ванадия, титана на структуру и механические свойства низколегированных сталей / К. Н. Соколов, В. А. Харченко и др. // Изв. вузов. Черная металлургия, 1983. – № 8. – С. 40–43.
8. Эффективность дораскисления колесной стали титаном / В. М. Бурдонос, Е. М. Огрызки и др. // Разливка стали в слитки и их качества. М., 1981. – № 9. – С. 88–89.
9. Микролегирование среднеуглеродистых сталей ванадием и титаном / И. Г. Узлов, В. К. Бабич и др. / М.: МиТОМ, 1987. – № 10. – С. 5–10.

10. Применение титана и его отходов в черной металлургии / Н. Н. Музыка, Н. Н. Мешко // Сб. «Улучшение свойств титановых сплавов и сталей и проблема использования титановых отходов». – Дн-ск: ДГУ, 1982. – С. 90–94.

11. Математическое описание зависимости процентного содержания титана в готовой стали от содержания углерода в металле перед выпуском из конвертера / Н. Н. Федоркова, В. О. Носенко и др. // Сб. науч. тр. «Повышение качества металлических конструкционных материалов. Безотходные технологические процессы». – Дн-ск: ДГУ, 1987. – С. 17–21.