МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 620.173.2:669.15-194 *Поступила 22.02.2018*

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

В. А. ЛУЦЕНКО, Т. Н. ГОЛУБЕНКО, О. В. ЛУЦЕНКО, А. С. КОЗАЧЕК, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, г. Днепр, Украина, пл. Академика Стародубова, 1. E-mail: lutsenko@optima.com.ua,
Н. А. ГЛАЗУНОВА, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37.

На основании математического и физико-химического моделирования изучено влияние легирующих элементов (хром, молибден, ванадий) на формирование механических свойств стали. Определены интервалы содержания легирующих элементов, обеспечивающие выполнение требуемых норм. Построены зависимости изменения механических свойств легированного проката от показателя структурного состояния d.

Ключевые слова. *Легированная сталь, механические свойства, статистика, хром, молибден, ванадий, предел прочности, относительное удлинение.*

THE IMPACT OF CHEMICAL COMPOSITION ON MECHANICAL PROPERTIES OF THE ALLOYED STEEL

V. A. LUTSENKO, T. N. GOLUBENKO, O. V. LUTSENKO, A. S. KOZACHEK, Ferous Metal Institute named after Z. I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine, Dnepr City, Ukraine, 1, Starodubov area. E-mail: lutsenko@optima.com.ua,
N. A. GLAZUNOVA, OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», Zhlobin City, Gomel Region, Belarus, 37, Promyshlennaya str.

Based on mathematical and physicochemical modeling a studied the effect of alloying elements (chromium, molybdenum, vanadium) in the formation of the mechanical properties of steel. The intervals of the content of alloying elements that ensure the fulfillment of the required norms are determined. Dependences of the change in the mechanical properties of doped rolled steel from the index of the structural state d are constructed.

Keywords. *Alloyed steel, mechanical properties, statistic, chrome, molybdenum, vanadium, ultimate strength, percent elongation.*

Современное машиностроение предъявляет все более высокие требования к эксплуатационным свойствам материалов. Применяя различные технологические схемы термической обработки легированного проката, можно изменять прочностные свойства путем воздействия на процессы структурообразования. Механические и эксплуатационные свойства металла определяются структурой металла, которая зависит от химического состава, условий деформации, температуры и режима охлаждения.

Традиционно основные параметры термической обработки устанавливаются на основании построенных термокинетических либо изотермических диаграмм. Кинетика распада аустенита и соответственно вид термокинетической диаграммы зависит от химического состава стали.

Стали, подвергающиеся упрочнению, легируют карбидообразующими элементами, которые повышают устойчивость переохлажденного аустенита [1, 2], улучшая закаливаемость. Значительный рост предела прочности при увеличении содержания хрома связан с расширением аустенитной области и соответственно увеличением прокаливаемости при ускоренном охлаждении. Большое количество хрома может приводить к появлению отпускной хрупкости, избежать которую возможно легированием молибденом в небольших количествах (до 0,3%). При дополнительном легировании ванадием может наблюдаться уменьшение закаливаемости при охлаждении с обычных температур, что проявляется в снижении поверхностной твердости и уменьшении глубины закаленного слоя. Это вызвано появлением мелко-

дисперсного карбида ванадия, который обладает зародышевым действием [3]. Увеличение прокаливаемости может быть достигнуто только в результате повышения температуры закалки.

В машино- и судостроении широко применяются ответственные детали, которые должны обладать износостойкостью в условиях высоких давлений, нагрузок и температур (форсунки, гильзы, плунжерные пары и др.). Износостойкость таких металлоизделий обеспечивается высокой прочностью в сочетании с вязкостью сердцевины. Необходимый уровень свойств достигается с помощью легирования и термической обработки путем воздействия на процессы структурообразования.

Необходимым комплексом свойств обладают стали, легированные хромом, молибденом и ванадием, например, марки 31CrMoV9, аналог 30Х3МФ (ГОСТ 4543).

Сталь 31CrMoV9 поставляется согласно европейской нормативной документации EN 10085:2001, в которой предъявляются требования по химическому составу (табл.1) и механическим свойствам (табл. 2).

Таблица 1. **Требования нормативов по химическому составу**

Стандарт	Содержание химических элементов, мас.%							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
EN 10085:2001 (31CrMoV9)	0,27–0,34	≤ 0,4	0,40–0,70	2,30–2,70	0,15–0,25	0,10–0,20	≤ 0,025	≤ 0,035
ГОСТ 4543 (30Х3МФ)	0,27–0,34	0,17–0,37	0,30–0,60	2,30–2,70	0,20–0,30	0,06–0,12	≤ 0,035	≤ 0,035

Таблица 2. **Требования нормативов по механическим свойствам**

Стандарт	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ_5,%	Ψ, %
EN 10085:2001 (31CrMoV9)	900–1100	≥ 700	≥ 11	–
ГОСТ 4543 (30Х3МФ)	≥ 980	≥ 835	≥ 12	≥ 55

Известно, что на структурообразование в процессе термической обработки решающее влияние оказывает содержание химических элементов в составе стали. Например, легирование карбидообразующими элементами способствует повышению закаливаемости. Поэтому представляет интерес изучение влияния на механические свойства стали выплавки с минимальным содержанием легирующих элементов (в пределах марочного состава) либо количество легирующих элементов, необходимых для гарантированного выполнения требований по свойствам.

Для оценки влияния химического состава стали на формирование свойств анализировали массив плавочных данных легированной стали. Исследования проводили с использованием прогнозной модели, разработанной в Институте черной металлургии НАН Украины (ИЧМ) [4], которая учитывает полный химический состав стали.

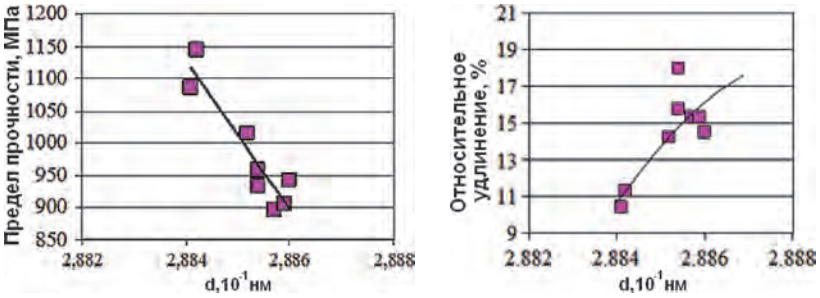
Существующие подходы к оптимизации химического состава стали, обеспечивающие необходимые механические свойства металлопродукции, как правило, базируются на статистических моделях состав–свойство и не отражают физико-химические аспекты поведения многокомпонентного расплава на завершающих стадиях технологии получения готовой продукции. Поскольку фазовые превращения являются следствием межатомного взаимодействия в многокомпонентном расплаве, осуществлялась «свертка» химического состава через параметр структурного состояния (*d*). В физическом плане параметр *d* представляет собой среднестатистическое межъядерное расстояние между взаимодействующими атомами исследуемой стали.

Данный подход к исследованию влияния химического состава на механические свойства металлопродукции разработан в ИЧМ и описан в работах [5–7].

Использование интегрального параметра, который отражает структурное состояние, в качестве «свертки» химического состава позволяет повысить эффективность решения задач оптимизации.

В качестве основной модели использовали зависимости механических свойств: предела прочности ($\sigma_в$) и относительного удлинения (δ_5) от структурного параметра *d*, определяющего взаимодействие легирующих элементов. Для выявления влияния структурного параметра *d* на свойства стали данные были разделены на диапазоны, в которых были рассчитаны средние значения для предела прочности и относительного удлинения.

В результате исследований установлены закономерности изменения параметра межатомного взаимодействия от количества легирующих элементов в составе стали и его взаимосвязь с механическими свойствами (рис. 1, 2).



а *б*

Рис. 1. Распределение предела прочности (*а*) и относительного удлинения (*б*) через структурный параметр исследуемой стали

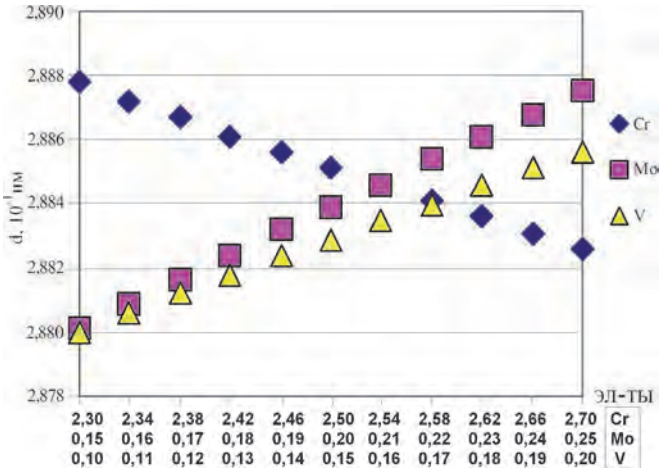


Рис. 2. Изменение структурного параметра в зависимости от содержания легирующих элементов

Уменьшение структурного параметра свидетельствует об усилении межатомных связей в системе, что обусловливает повышение предела прочности и снижение относительного удлинения для стали 31CrMoV9. Для исследуемой стали 31CrMoV9 были построены математические зависимости взаимосвязи структурного параметра (d) и механических свойств ($\sigma_в$, δ_5):

$$\delta_5 = 199{,}6d^2 - 570d,\ (R = 0{,}7),$$

$$\sigma_в = -115015d + 332831,\ (R = 0{,}8).$$

где $\sigma_в$ – предел прочности; δ_5 – относительное удлинение; d – структурный переметр.

Граничные условия для параметра d и химического состава определяются в соответствии с приведенными диаграммами на рис. 1, 2.

Для обеспечения свойств легированной стали, соответствующих EN 10085:2001, величина структурного параметра должна составлять $d \cdot 10^{-1} = 2{,}8843–2{,}8860$ нм. Как видно из рис. 2, повышение содержания хрома приводит к уменьшению параметра d, сокращению расстояния между атомами, что увеличивает прочность. Молибден и ванадий в данной стали действуют противоположно, повышая параметр d, что свидетельствует о росте пластичности. Таким образом, выплавка стали 31CrMoV9 с пониженным содержанием молибдена и ванадия (в пределах марочного) приведет к снижению пластичности стали. В то же время при уменьшении содержания хрома прочность останется на достаточно высоком уровне.

Согласно полученным диаграммам, определено, что для гарантированного выполнения требований предела прочности (900–1100 МПа) и относительного удлинения (> 11%) стали 31CrMoV9 количество легирующих элементов должно соответствовать следующему содержанию: 2,42–2,62% Cr, 0,2–0,23% Mo и 0,17–0,20% V.

На основании полученных результатов можно прогнозировать уровень механических свойств для определенного химического состава хромомолибденованадиевой стали.

Для проверки рекомендаций были проанализированы механические свойства стали 31CrMoV9 производства ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК». Содержание легирующих элементов в стали 31CrMoV9 различных плавок изменялось в следующих диапазонах: 2,51–2,57% Cr, 0,21–0,23% Mo и 0,18–0,20% V, что соответствует нормам EN 10085:2001 (табл. 1), а также вписывается в приведенные выше интервалы, гарантирующие выполнение свойств.

Механические испытания показали, что свойства стали также отвечают требуемым в EN 10085:2001 (табл. 2) и составляют: предел прочности $\sigma_в$ = 904–1085 МПа и относительное удлинение δ_5 = 11–18%.

Для стали аналога 30Х3МФ, поставляемой согласно ГОСТ 4543, регламентирован низкий предел содержания ванадия 0,06–0,12%, что коррелирует с предъявляемыми высокими требованиями по пределу прочности более 980 МПа по сравнению с 900–1100 МПа по нормам EN 10085.

Выводы

Установлены особенности влияния химического состава на механические свойства стали 31CrMoV9. Построены зависимости механических свойств (предела прочности и относительного удлинения) от физико-химического критерия – структурного модельного параметра *d* (среднестатистическое расстояние между взаимодействующими атомами исследуемой стали). Показано, что повышение содержания хрома увеличивает предел прочности, а легирования молибденом и ванадием повышает пластичность. Это дает возможность прогнозировать уровень механических свойств легированной стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гуляев А. П.** Металловедение / А. П. Гуляев. М.: Металлургия, 1986. 542 с.

2. **Меськин В. С.** Основы легирования стали / В. С. Меськин. Изд. 2-е. М.: Металлургия, 1964. 685 с.

3. **Гудремон Э.** Специальные стали / Э. Гудремон. В 2-х т., изд. 2-е. М.: Металлургия, 1966. 1274 с.

4. **Приходько Э. В.** Физико-химическое моделирование процессов межатомного взаимодействия в металлургических расплавах / Э. В. Приходько, Д. Н. Тогобицкая // ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». 1999. № 7. С. 72–83.

5. **Информационно**-математическое обеспечение оценки влияния химического состава на свойства готового проката / Э. В. Приходько, Д. Н. Тогобицкая, А. С. Козачек и др. // Системные технологии. Региональный межвуз. сб. науч. работ. Днепропетровск, 2010. С. 33–39.

6. **Системный** подход к выбору оптимального элементного состава стали, обеспечивающего требуемый уровень механических свойств / Д. Н. Тогобицкая, В. П. Пиптюк, И. Н. Логозинский и др. // Системные технологии. Региональный межвуз. сб. науч. работ. Днепропетровск, 2015. С. 91–97.

7. **Оптимизация** химического состава стали 14Х17Н2 на основе концепции направленной химической связи / Д. Н. Тогобицкая, В. П. Пиптюк, И. Н. Логозинский и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Днепропетровск: «Візіон», 2015. Вып. 30. С. 312–323.

REFERENCES

1. **Guljaev A. P.** *Metallovedenie* [Metallurgy]. Moscow, Metallurgija Publ., 1986, 542 p.

2. **Mes'kin V. S.** *Osnovy legirovanija stali* [Fundamentals of alloying steel]. Moscow, Metallurgija Publ., 1964, 685 p.

3. **Gudremon E.** *Special'nye stali* [Special steels]. Moscow, Metallurgija Publ., 1966, 1274 p.

4. **Prihod'ko E. V., Togobickaja D. N.** Fiziko-himicheskoe modelirovanie processov mezhatomnogo vzaimodejstvija v metallurgicheskih rasplavah [Physico-chemical modeling of the processes of interatomic interaction in metallurgical melts]. *GVUZ «Priazovskij gosudarstvennyj tehnicheskij universitet» = GVUZ «Priazovsky State Technical University»*, 1999, no. 7, pp. 72–83.

5. **Prihod'ko E. V., Togobickaja D. N., Kozachek A. S.** Informacionno-matematicheskoe obespechenie ocenki vlijanija himicheskogo sostava na svojstva gotovogo prokata [Information and mathematical support of the assessment of the effect of the chemical composition on the properties of finished rolled products]. *Sistemnye tehnologii. Regional'nyj mezhvuzovskij sbornik nauchnyh rabot = System technologies. Regional interuniversity collection of scientific works*. Dnepropetrovsk, 2010, pp. 33–39.

6. **Togobickaja D. N., Piptjuk V. P., Logozinskij I. N.** Sistemnyj podhod k vyboru optimal'nogo jelementnogo sostava stali, obespechivajushhego trebuemyj uroven' mehanicheskih svojstv [System approach to the choice of the optimal elemental composition of steel, which provides the required level of mechanical properties]. *Sistemnye tehnologii. Regional'nyj mezhvuzovskij sbornik nauchnyh rabot = System technologies. Regional interuniversity collection of scientific works*. Dnepropetrovsk, 2015, pp. 91–97.

7. **Togobickaja D. N., Piptjuk V. P., Logozinskij I. N.** Optimizacija himicheskogo sostava stali 14H17N2 na osnove koncepcii napravlennoj himicheskoj svjazi [Optimization of the chemical composition of 14X17H2 steel on the basis of the concept of directional chemical bonding]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]. Dnepropetrovsk: «Vizion» Publ., 2015, vyp. 30б, pp. 312–323.