

В. А. Луценко, Е.В. Парусов, Т.М. Голубенко, О.В. Луценко, О.В. Парусов,  
І.М. Чуйко, Л.В. Сагура, Г.І. Сівак

## ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЙНИХ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

*Інститут черної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

Метою роботи є визначення інтервалів вмісту легуючих елементів у конструкційних легованих сталях, що забезпечують отримання механічних властивостей та відповідність прокату вимогам європейських стандартів. Дослідження проводилися з використанням прогновної моделі, розробленої Інститутом чорної металургії НАН України, що враховує повний хімічний склад сталі. Виявлено закономірності зміни параметра міжатомної взаємодії від кількості легуючих елементів у складі сталі та його взаємозв'язок із механічними властивостями. Побудовано залежності механічних властивостей (граніця міцності, відносне подовження) від хімічного складу сталі через фізико-хімічний критерій – середньостатистичну відстань між взаємодіючими атомами (структурний параметр  $d$ ). Встановлено взаємозв'язок між хімічним складом та механічними властивостями хромомолібденовмістких конструкційних сталей. Показано, що підвищення вмісту хрому збільшує граніцу міцності, а легування молібденом та ванадієм підвищує пластичність прокату. Визначено, що для гарантованого виконання вимог граніци міцності (900...1100 МПа) та відносного подовження ( $> 11\%$ ) для сталі 31CrMoV9 вміст легуючих елементів повинен відповідати наступним інтервалам: 2,42-2,62%Cr, 0,2-0,23%Mo і 0,17-0,20%V. Отримані результати дають змогу прогнозувати механічні властивості легованого прокату в залежності від фактичного хімічного складу сталі.

**Ключові слова:** легована сталь, параметр міжатомної взаємодії, хімічний склад, механічні властивості, граніця міцності, відносне подовження

**Стан питання.** Сучасне машинобудування пред'являє все більш високі вимоги до експлуатаційних властивостей матеріалів. Застосовуючи різноманітні технологічні способи термічної обробки легованого прокату, можна змінювати показники міцності за рахунок впливу на процеси структуроутворення. Механічні та експлуатаційні властивості визначаються структурою прокату, яка залежить від хімічного складу сталі, режимів деформації, температури та швидкості охолодження. У машинобудуванні широко використовуються деталі відповідального призначення, які повинні мати задовільну зносостійкість в умовах високого тиску, навантажень і температур (форсунки, гільзи, плунжерні пари та ін.). Зносостійкість таких металовиробів забезпечується високою міцністю в поєднанні з в'язкістю серцевини. Необхідний рівень якості досягається за допомогою легування та термічної обробки за рахунок впливу на процеси структуроутворення. Такий комплекс властивостей мають сталі, леговані хромом, молібденом і ванадієм: 31CrMoV9 та

42CrMo4 (аналог 30X3MФ і 38XM по ГОСТ 4543-2016). Вказані сталі виготовляються згідно з європейськими стандартами (EN 10085:2001 та EN 10083:2006), в яких пред'являються вимоги до хімічного складу (табл.1) та механічних властивостей (табл.2).

Таблиця 1. Вимоги нормативної документації до хімічного складу сталей

Марка сталі (стандарт)	Вміст хімічних елементів, % ваг.							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
31CrMoV9 (EN 10085:2001)	0,27	≤	0,40	2,30	0,15	0,10	≤	≤
	-	0,4	-	-	-	-	0,025	0,035
30X3MФ (ГОСТ 4543- 2016)	0,27	0,17	0,30	2,30	0,20	0,06	≤	≤
	-	-	-	-	-	-	0,035	0,035
42CrMo4 (EN 10083:2006)	0,38	≤0,4	0,60	0,90	0,15	-	≤0,025	0,020- 0,035
	-	-	-	-	-	-	-	-
38XM (ГОСТ 4543- 2016)	0,35	0,17	0,35	0,90	0,20	-	≤	≤
	-	-	-	-	-	-	0,035	0,035
	0,42	0,37	0,65	1,30	0,30	-	-	-

Таблиця 2. Вимоги нормативної документації до механічних властивостей сталей

Марка сталі	Стандарт	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_r$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
31CrMoV9	EN 10085:2001	900-1100	≥ 700	≥ 11	-
30X3MФ	ГОСТ 4543-2016	≥ 980	≥ 835	≥ 12	≥ 55
42CrMo4	EN 10083:2006	800-950	>550	> 13	> 50
38XM	ГОСТ 4543-2016	>980	>885	>11	>45

Традиційно основні параметри режиму термічної обробки встановлюються на підставі побудованих термодинамічних або ізотермічних діаграм. Кінетика розпаду аустеніту та, відповідно, вигляд термодинамічної діаграми залежить здебільшого від хімічного складу сталі. Сталі, що піддаються термічному зміцненню, легують карбідоутворюючими елементами, які збільшують стійкість переохолодженого аустеніту [1,2] і відповідно підвищують загартовуваність металовиробів. Значне зростання границі міцності при збільшенні вмісту хрому пов'язане з розширенням аустенітної області і, відповідно, збільшенням прогартовуваності. Велика кількість хрому може призводити до появи відпускнуї крихкості, уникнути якої можливо легуванням молібденом у невеликих кількостях (до 0,3 %). При додатковому легуванні сталі ванадієм може спостерігатися зменшення загартовуваності, що проявляється в зниженні поверхневої твердості й зменшенні глибини загартованого шару [3].

Відомо, що на формування структури сталі в процесі термічної обробки великий вплив має вміст хімічних елементів, тому становить інтерес встановити взаємозв'язок між хімічним складом сталі та механічними властивостями конструкційного легованого прокату.

**Мета роботи.** Визначити інтервали вмісту легуючих елементів у конструкційних легованих сталях, які забезпечують отримання необхідних механічних властивостей та відповідність прокату вимогам європейських стандартів .

**Методика досліджень.** Для оцінки впливу хімічного складу на формування властивостей аналізувався масив даних сталей (31CrMoV9 і 42CrMo4) різних плавок. Дослідження проводилися з використанням прогнозної моделі, розробленої Інститутом чорної металургії НАН України (ІЧМ) [4], яка враховує повний хімічний склад сталі. Існуючі підходи до оптимізації хімічного складу сталі, що забезпечують необхідні механічні властивості металопродукції, як правило, базуються на статистичних моделях склад-властивість і не відображають фізико-хімічні аспекти поведінки багатокомпонентного розплаву на завершальних стадіях технології отримання готової продукції. Оскільки фазові перетворення є наслідком міжатомної взаємодії в багатокомпонентному розплаві, здійснювалася «згортка» хімічного складу через параметр структурного стану ( $d$ ). У фізичному плані параметр  $d$  являє собою середньостатистичну між'ядерну відстань між взаємодіючими атомами досліджуваної сталі. Такий підхід до встановлення впливу хімічного складу на механічні властивості сталей детально описаний в роботах [5-8]. Використання інтегрального параметру, який відображає структурний стан сталі, як "згортки" хімічного складу дозволяє раціонально підійти до вирішення завдань оптимізації. В якості основної моделі використовувалися залежності механічних властивостей: границі міцності ( $\sigma_B$ ) і відносного подовження ( $\delta_5$ ) від структурного параметра  $d$ , який визначає взаємодію легуючих елементів.

### Результати досліджень.

Для встановлення взаємозв'язку параметру  $d$  з властивостями сталі вихідні дані були розділені на інтервали, в яких були розраховані середні значення для границі міцності і відносного подовження. В результаті досліджень виявлено закономірності зміни параметра міжатомної взаємодії від кількості легуючих елементів у складі сталі та його взаємозв'язок із механічними властивостями (рис. 1, 2).

Зменшення структурного параметра свідчить про посилення міжатомних зв'язків у системі, що обумовлює підвищення границі міцності та зниження відносного подовження для сталі 31CrMoV9. Для досліджуваної сталі були побудовані математичні залежності взаємозв'язку параметру  $d$  і механічних властивостей:

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

$$\sigma_B = -115015 \cdot d + 332831 \quad (R = 0,8),$$

де  $\sigma_B$  – границя міцності;  $\delta_5$  – відносне подовження;  $d$  – структурний параметр.

Граничні умови для параметра  $d$  і хімічного складу сталі визначаються відповідно до діаграми на рис.2.

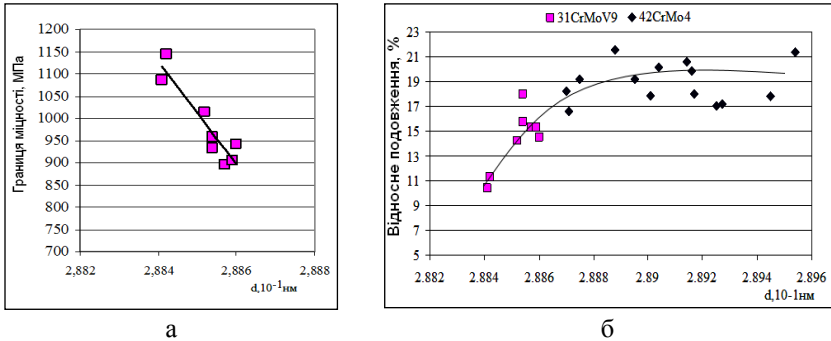


Рисунок 1 – Розподіл границі міцності (а) та відносного подовження (б) через структурний параметр ( $d$ ) досліджуваних сталей.

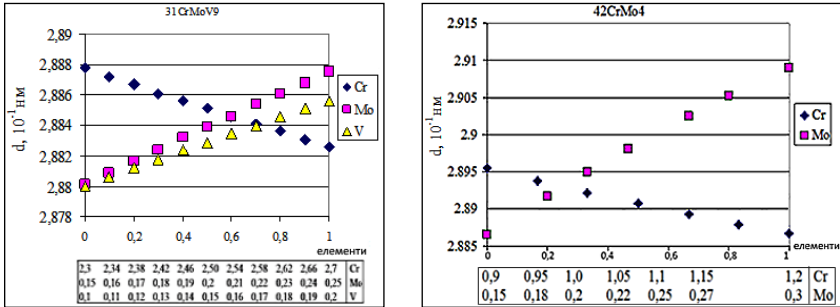


Рисунок 2 – Взаємозв'язок параметру  $d$  та вмісту легуючих елементів у досліджуваних сталях

Для забезпечення властивостей сталі 31CrMoV9 вимогам EN 10085:2001 величина структурного параметру повинна становити:  $d \cdot 10^{-1} = 2,8843 \dots 2,8860$  нм. Як видно з рис.2, підвищення вмісту хрому призводить до зменшення параметру  $d$  (скорочення відстані між атомами), а це підвищує показники міцності сталі. Молибден і ванадій діють протилежно хрому, підвищуючи параметр  $d$ , що говорить про підвищення пластичності. Таким чином, виплавка сталі 31CrMoV9 зі зниженням вмісту молибдену й ванадію (в межах марочного) призведе до зниження пластичності сталі. У той же час при зниженні вмісту хрому міцність

залишитися на досить високому рівні. Згідно з отриманими діаграмами, визначено, що для гарантованого виконання вимог границі міцності (900...1100 МПа) та відносного подовження ( $> 11\%$ ) для сталі 31CrMoV9 вміст легуючих елементів повинен відповідати наступним інтервалам: 2,42...2,62 % Cr, 0,2...0,23 % Mo і 0,17...0,20 % V.

Отримані результати дозволяють прогнозувати механічні властивості прокату для певного хімічного складу хромомолібденованадієвих сталей. З метою перевірки встановлених особливостей були проаналізовані механічні властивості промислових партій прокату зі сталі 31CrMoV9 виробництва ВАТ "БМЗ – керуюча компанія холдингу "БМК". Вміст легуючих елементів у сталі 31CrMoV9 різних плавок змінювався в таких діапазонах: 2,51...2,57 % Cr, 0,21...0,23 % Mo і 0,18...0,20 % V, що відповідає вимогам стандарту EN 10085:2001 (див. табл.1) і вище наведеним інтервалам, які гарантують отримання необхідних властивостей. Механічні випробування показали, що властивості сталі відповідають EN 10085:2001 (див. табл.2) і становлять:  $\sigma_B=904\text{...}1085$  МПа,  $\delta_5=11\text{...}18\%$ . Для сталі-аналога 30X3MF, що поставляється за ГОСТ 4543-2016, регламентовано вміст ванадію 0,06...0,12 %, що корелює з високими вимогами до границі міцності  $> 980$  МПа, у порівнянні з 900...1100 МПа за EN 10085:2001.

**Висновки.** Встановлено взаємозв'язок між хімічним складом та механічними властивостями хромомолібденовмістких конструкційних сталей. Показано, що підвищення вмісту хрому збільшує границю міцності, а легування молібденом та ванадієм підвищує пластичність прокату. Побудовано залежності механічних властивостей (границя міцності, відносне подовження) від хімічного складу сталі через фізико-хімічний критерій – середньостатистичну відстань між взаємодіючими атомами (структурний параметр  $d$ ). Отримані результати дозволяють прогнозувати механічні властивості легованого прокату в залежності від фактичного хімічного складу сталі.

### Библиографический список

1. Гуляев А. П. Металловедение. / Гуляев А. П. – М.: Металлургия. – 1986. – 542 с.
2. Меськин В. С. Основы легирования стали / Меськин В. С. – [изд.2-е] – М.: Металлургия. – 1964. – 685с.
3. Гудремон Э. Специальные стали. / Гудремон Э.; перев. с нем. под. ред. А. С. Займовского, М. Л. Бернштейна, В. С. Меськина: [в 2 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 «Призывский государственный технический университет». – 1999. – № 7. – С. 72-83.

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»,  
Сборник научных трудов ИЧМ. – 2018. - Вып.32*

5. Приходько Э. В. 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 межвузовский сборник научных работ. – Днепропетровск, 2010. – С. 33-39.
6. Тогобицкая Д. Н. 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 межвузовский сборник научных работ. – Днепропетровск, 2015. – С. 91-97.
7. Тогобицкая Д. Н. Оптимизация химического состава стали 14X17H2 на основе концепции направленной химической связи / Д. Н. Тогобицкая, В. П. Пиптюк, И.Н. Логозинский и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Дн-ск: «Візіон». – 2015. – Вып. 30. – С. 312-323.

### Reference

1. Gulyayev A P. Metallovedeniye. / Gulyayev A.P. – М.: Metallurgiya. – 1986. – 542 s.
2. Mes'kin V.S. Osnovy legirovaniya stali / Mes'kin V. S. – [izd.2 ye] – М.: Metallurgiya. – 1964. – 685s.
3. Gudremon E. Spetsial'nyye stali. / Gudremon E.; perev. s nem. pod. red. A.S. Zaymovskogo, M.L. Bernshteyna, V.S. Mes'kina: [v 2 t.] – [izd. 2-ye] – М.: Metallurgiya. – 1966. – 1274 s.
4. Prikhod'ko E.V. Fiziko-khimicheskoye modelirovaniye protsessov mezhatomnogo vzaimodeystviya v metallurgicheskikh rasplavakh / E.V. Prikhod'ko, D.N. Togobitskaya // GVUZ «Priazovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet». – 1999. – № 7. – S. 72-83.
5. Prikhod'ko E.V. Informatsionno-matematicheskoye obespecheniye otsenki vliyaniya khimicheskogo sostava na svoystva gotovogo prokata / E.V. Prikhod'ko, D.N. Togobitskaya, A.S. Kozachek i dr. // Sistemnyye tekhnologii. Regional'nyy mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh работ. – Dnepropetrovsk, 2010. – S. 33-39.
6. Togobitskaya D.N. Sistemnyy podkhod k vyboru optimal'nogo elementnogo sostava stali, obespechivayushchego trebuyemyy uroven' mekhanicheskikh svoystv / D.N. Togobitskaya, V.P. Pipyuk, I.N. Logozinskiy i dr. // Sistemnyye tekhnologii. Regional'nyy mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh работ. – Dnepropetrovsk, 2015. – S. 91-97.
7. Togobitskaya D.N. Optimizatsiya khimicheskogo sostava stali 14KH17N2 na osnove kontseptsii napravlennoy khimicheskoy svyazi / D.N. Togobitskaya, V.P. Pipyuk, I.N. Logozinskiy i dr. // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. – Dn-sk: «Vізіon». – 2015. – Vyp. 30. – S. 312-323.

*В.А. Луценко, Э.В. Парусов, Т.Н. Голубенко, О.В. Луценко, О.В. Парусов, И.Н. Чуйко, Л.В. Сагура, А.И. Сивак*

**Взаимосвязь химического состава и механических свойств конструкционных легированных сталей**

Целью работы является определение интервалов содержания легирующих элементов в конструкционных легированных сталях, обеспечивающих получение механических свойств и соответствие проката требованиям европейских стандартов. Исследования проводились с использованием прогнозной модели, разработанной Институтом черной металлургии НАН Украины, учитывающий полный химический состав стали. Выявлены закономерности изменения параметра межатомного взаимодействия от количества легирующих элементов в составе стали и его взаимосвязь с механическими свойствами. Построены зависимости механических свойств (предел прочности, относительное удлинение) от химического состава стали через физико-химический критерий - среднестатистическое расстояние между взаимодействующими атомами (структурный параметр  $d$ ). Установлена взаимосвязь между химическим составом и механическими свойствами хромомолибденовмистких конструкционных сталей. Показано, что повышение содержания хрома увеличивает предел прочности, а легирования молибденом и ванадием повышает пластичность проката. Определено, что для гарантированного выполнения требований предела прочности (900 ... 1100 МПа) и относительного удлинения ( $> 11\%$ ) для стали 31CrMoV9 содержание легирующих элементов должно соответствовать следующим интервалам: 2,42-2,62%Cr, 0,2-0,23%Mo и 0,17-0,20%V. Полученные результаты позволяют прогнозировать механические свойства легированного проката в зависимости от фактического химического состава стали.

**Ключевые слова:** легированная сталь, параметр межатомного взаимодействия, химический состав, механические свойства, предел прочности, относительное удлинение

*V. A. Lutsenko, E. V. Parusov, T. N. Golubenko, O. V. Lutsenko, O. V. Parusov, I. N. Chuiko, L. S. Sahura, A. I. Sivak,*

**The interrelation of the chemical composition and mechanical properties of constructional alloyed steels**

The aim of the work is to determine the content intervals of alloying elements in structural alloyed steels, which ensure the obtaining of mechanical properties and the conformity of rolled products to the requirements of European standards. The studies were conducted using a predictive model developed by the Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, taking into account the full chemical composition of the steel. The regularities of changes in the interatomic interaction parameter on the number of alloying elements in the steel composition and its relationship with mechanical properties are revealed. The dependences of mechanical properties (tensile strength, relative elongation) on the chemical composition of steel are constructed through the physicochemical criterion – the average statistical distance between interacting atoms (structural parameter  $d$ ). The interrelation between the chemical composition and mechanical properties of chrome-molybdenum structural steels has been established. It is shown that increasing the chromium content increases the tensile strength, and doping with molybdenum and vanadium increases the ductility of rolled products. It was determined that in order to guarantee compliance with the

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»,  
Сборник научных трудов ИЧМ. – 2018. - Вып.32*

requirements of the ultimate strength (900-1100 MPa) and relative elongation (> 11%) for steel 31CrMoV9, the content of alloying elements should correspond to the following intervals: 2.42-2.62%Cr, 0.2-0, 23%Mo and 0.17-0.20%V. The results obtained make it possible to predict the mechanical properties of doped steel, depending on the actual chemical composition of the steel.

**Keywords: alloyed steel, interatomic interaction parameter, chemical composition, mechanical properties, tensile strength, relative elongation**

*Стаття надійшла до редакції збірника 25.10.2018 року, пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування (Протокол засідання редакційної колегії збірника №1 від 26 грудня 2018 року)  
Рецензенти: д.т.н., проф. Д.В.Лаухін, д.т.н. Г.В.Левченко*