

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 669.018.28

Михневич А.С., Столяров А.М., Юдин Д.В.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТЕЙНОЙ СТАЛИ РАЗНЫХ МАРОК

Аннотация. Литейная сталь выплавлялась в дуговой сталеплавильной печи вместимостью 25 т. В работе определены механические свойства литейной стали 60 плавок стали марок 20Л, 25Л, 30Л и 35Л. Химический состав литейной стали в основном различался по содержанию в металле углерода, а отличие в содержании других элементов было незначительным. В лаборатории механических испытаний определены следующие параметры механических свойств стали: предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость и твердость по Бринеллю. С использованием корреляционного анализа установлена тесная взаимосвязь между параметрами свойств. Временное сопротивление оказывает наиболее сильное влияние на все остальные параметры механических свойств. Корреляционно-регрессионный анализ влияния на механические свойства стали каждого из химических элементов позволил выявить статистически значимые линейные зависимости всех параметров свойств от содержания углерода в металле. Рассчитаны значения содержания углерода, необходимые для выполнения требований стандарта по механическим свойствам. Рекомендован суженный интервал содержания углерода в выплавляемом металле: от минимального до среднего значений, рекомендуемых стандартом. Это позволит снизить расход углеродосодержащих материалов и сократить продолжительность плавки стали в ДСП.

Ключевые слова: литейная сталь, химический состав, содержание углерода, механические свойства

Литейная сталь выплавлялась в дуговой сталеплавильной печи вместимостью 25 т, оборудованной трансформатором мощностью 18 МВА. Из полученных отливок вырезались пробы для определения механических свойств металла. В работе определены механические свойства литейной стали 60 плавок: 18 (или 30% от общего количества), 10 (17%), 13 (22%) и 19 (31%) плавок стали марок 20Л, 25Л, 30Л и 35Л соответственно. Область применения стали данных марок [1-8]:

20Л – арматура, детали сварно-литых конструкций и другие детали, работающие при температуре от –40 до 450°C;

25Л – станины прокатных станов, траверсы, поршни, крышки цилиндров, плиты настольные, корпуса подшипников, детали сварно-литых конструкций и другие детали, работающие при температуре от –40 до 450°C под давлением;

30Л – фасонные отливки деталей общего машиностроения, изготавливаемые методом выплавляемых моделей;

35Л – детали с требованиями повышенной прочности и высокого сопротивления износу, работающие под действием статических и динамических нагрузок.

Усредненный химический состав литейной стали разных марок представлен в табл. 1.

Из этих данных видно, что химический состав литейной стали в основном различался по содержанию в металле углерода, а отличие в содержании других элементов было незначительным.

Таблица 1

Среднее содержание химических элементов в стали
(% по массе)

Марка стали	Химический элемент									
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	
20Л	0,215	0,328	0,603	0,012	0,019	0,234	0,129	0,113	0,06	
25Л	0,265	0,357	0,650	0,011	0,021	0,231	0,135	0,108	0,05	
30Л	0,306	0,330	0,690	0,012	0,019	0,269	0,146	0,122	0,05	
35Л	0,346	0,360	0,640	0,011	0,019	0,220	0,092	0,095	0,06	

В лаборатории механических испытаний определялись следующие механические свойства стали: предел текучести (σ_T , МПа), временное сопротивление (σ_B , МПа), относительное удлинение (δ , %), относительное сужение (ψ , %), ударная вязкость (КСУ, Дж/см²), твердость по Бринеллю (НВ). Для определения этих свойств использовалось следующее оборудование: универсальная испытательная машина (рис. 1, а), прибор полуавтоматический ТБ 5004 для измерения твердости металлов по методу Бринелля (рис. 1, б), маятниковый копер РН300 (рис. 1, в).

В табл. 2 приведены средние значения механических свойств литейной стали разных марок.

В результате корреляционного анализа всех значений механических свойств была получена матрица коэффициентов парной корреляции, показанная в табл. 3.



а



б



в

Рис. 1. Вид приборов для определения механических свойств стали:

а – универсальная испытательная машина; б – прибор полуавтоматический ТБ 5004 для измерения твердости металлов по методу Бринелля; в – маятниковый копер РН300

Таблица 2

Усредненные значения механических свойств литейной стали разных марок

Марка стали	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	НВ
20Л	265	474	29	48	107	135
25Л	298	526	26	43	98	146
30Л	319	562	24	40	68	159
35Л	333	583	21	34	64	162

Таблица 3

Значения коэффициентов парной корреляции

Параметр	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	НВ	σ_B , МПа
σ_T , МПа	1					
δ , %	-0,702	1				
ψ , %	-0,571	0,766	1			
КСУ, Дж/см ²	-0,596	0,647	0,597	1		
НВ	0,898	-0,703	-0,592	-0,695	1	
σ_B , МПа	0,924	-0,731	-0,644	-0,707	0,947	1

Все значения коэффициентов парной корреляции по модулю превышают критическое значение, равное 0,415 для количества данных 60 (число степени свободы равно 58) и уровня значимости ошибки 0,1%. При этом следует выделить временное сопротивление σ_B , оказывающее наиболее сильное влияние на все остальные параметры механических свойств.

Данное влияние характеризуется следующими линейными уравнениями:

$$\sigma_T = 0,643 \cdot \sigma_B - 41,37; \quad (1)$$

$$\delta = 53,71 - 0,054 \cdot \sigma_B; \quad (2)$$

$$\psi = 92,34 - 0,096 \cdot \sigma_B; \quad (3)$$

$$KCU = 273,01 - 0,353 \cdot \sigma_B; \quad (4)$$

$$HB = 0,253 \cdot \sigma_B + 15,55. \quad (5)$$

На рис. 2 показано графическое изображение зависимости (5) с наибольшим значением коэффициента парной корреляции.

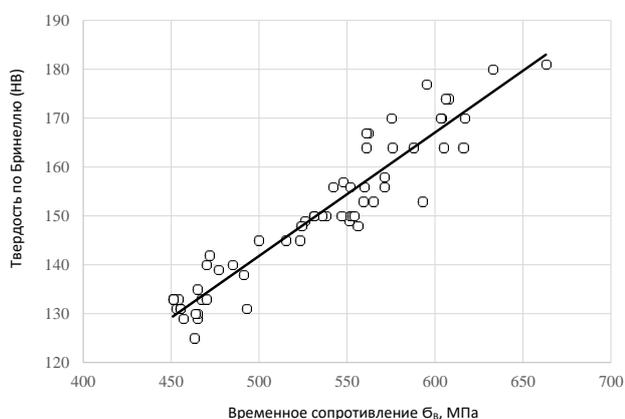


Рис. 2. Зависимость твердости по Бринеллю от временного сопротивления литейной стали

Корреляционно-регрессионный анализ влияния на механические свойства стали каждого из химических элементов позволил выявить статистически значимые линейные зависимости всех параметров свойств только от содержания углерода в металле:

$$\sigma_T = 471,44 \cdot [C] + 167,87; \quad r = 0,723; \quad (6)$$

$$\sigma_B = 729,93 \cdot [C] + 325,99; \quad r = 0,779; \quad (7)$$

$$\delta = 38,43 - 46,96 \cdot [C]; \quad r = -0,683; \quad (8)$$

$$\psi = 65,45 - 85,17 \cdot [C]; \quad r = -0,611; \quad (9)$$

$$KCU = 171,34 - 304,88 \cdot [C]; \quad r = -0,652; \quad (10)$$

$$HB = 172,65 \cdot [C] + 101,2; \quad r = 0,691. \quad (11)$$

На рис. 3 и 4 приведены графические изображения выявленных зависимостей (6)–(11).

В табл. 4 представлены требования к параметрам механических свойств литейной стали в соответствии с ГОСТ 977-88.

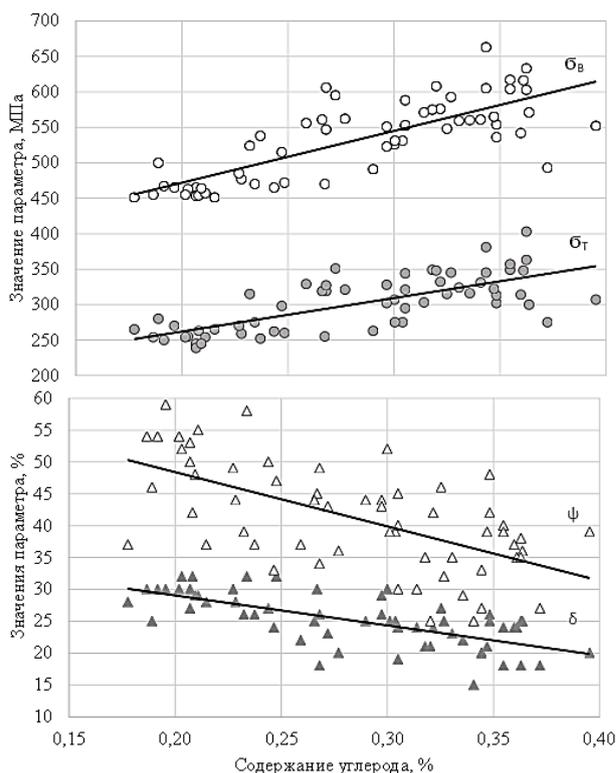


Рис. 3. Возрастающие зависимости временного сопротивления (σ_B), предела текучести (σ_T) и убывающие зависимости относительного сужения (ψ), относительного удлинения (δ) от содержания углерода в стали

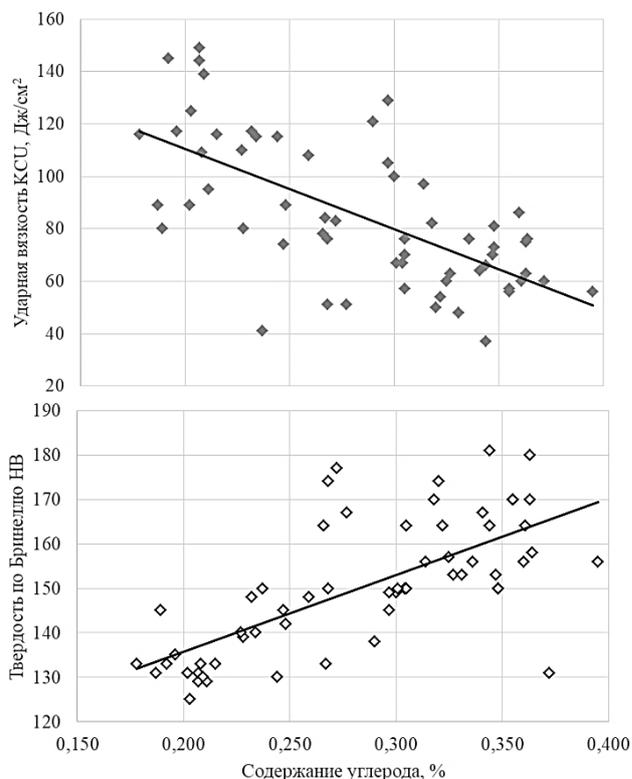


Рис. 4. Зависимости ударной вязкости и твердости по Бринеллю от содержания углерода

Таблица 4

Механические свойства литейной стали
по ГОСТ 977-88

Марка стали	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	НВ
20Л	≥ 216	≥ 412	≥ 22	≥ 35	≥ 49	116–144
25Л	≥ 235	≥ 441	≥ 19	≥ 30	≥ 39	121–151
30Л	≥ 255	≥ 471	≥ 17	≥ 30	≥ 34	131–157
35Л	≥ 275	≥ 491	≥ 15	≥ 25	≥ 34	137–166

Предельные значения каждого параметра механических свойств из табл. 4 были подставлены в соответствующие уравнения (6)–(11) и вычислены значения содержания углерода, необходимые для выполнения требований стандарта. Данные значения приведены в табл. 5.

Данные табл. 5 свидетельствуют о том, что для выполнения требуемого уровня механических свойств литейной стали содержание углерода в металле достаточно иметь на минимальном уровне по требованию ГОСТ 977-88. Поэтому рекомендуется получать содержание углерода в выплавляемом металле в суженном интервале: от минимального до среднего значений, рекомендуемых стандартом. Это позволит снизить расход углеродсодержащих материалов и сократить продолжительность плавки стали в ДСП.

Заключение

В работе определены механические свойства литейной стали 60 плавки стали марок 20Л, 25Л, 30Л и 35Л. Химический состав литейной стали в основном различался по содержанию в металле углерода, а отличие в содержании других элементов было незначительным. В лаборатории механических испытаний определены следующие параметры механических свойств стали: предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость и твердость по Бринеллю. Установлена тесная взаимосвязь между параметрами. Временное сопротивление оказывает наиболее сильное влияние на все остальные параметры механических свойств. Корреляционно-регрессионный анализ

влияния на механические свойства стали каждого из химических элементов позволил выявить статистически значимые линейные зависимости всех параметров свойств от содержания углерода в металле. Рассчитаны значения содержания углерода, необходимые для выполнения требований стандарта по механическим свойствам. Рекомендован суженный интервал содержания углерода в выплавляемом металле: от минимального до среднего значений, рекомендуемых стандартом. Это позволит снизить расход углеродсодержащих материалов и сократить продолжительность плавки стали в ДСП.

Список источников

1. Еланский Г.Н., Линчевский Б.В., Кальменев А.А. Основы производства и обработки металлов. М.: МГВМИ, 2005. 416 с.
2. Вальтер А.И., Протопопов А.А. Основы литейного производства. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 333 с.
3. Связь свойств металлов в жидком и твердом состоянии / Гельд П.В., Баум Б.А., Тягунов Г.В. и др. // Свойства расплавленных металлов. М.: Наука, 1974. С. 7-10.
4. Кондратюк С.Е. Наследственность структуры и свойств литой стали. М.: Литейное производство, 2008. №9. С. 6-10.
5. Ковшечая обработка стали с вдуванием флюидизированной извести / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А.М. Столяров, В.В. Мошкунев // Теория и технология металлургического производства. 2016. №2 (19). С. 26 – 29.
6. Ушаков С.Н. Десульфурация стали на агрегате «ковш-печь» // Теория и технология металлургического производства. 2020. №2 (33). С. 4–10.
7. О способах воздействия на процесс формирования стальной непрерывнолитой заготовки / Сомнат Басу, А.М. Столяров, М.В. Потапова, С.В. Дидович // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1 (45). С. 24 – 27.
8. Федоров В.Б., Шоршоров М.Х., Хакимова Д.К. Углерод и его взаимодействие с металлами. М.: Металлургия, 1978. 208 с.

Таблица 5

Расчетные значения содержания углерода (%) в литейной стали для выполнения ее механических свойств

Марка стали	σ_T	σ_B	δ	ψ	KCU	НВ	ГОСТ 977-88
20Л	$\geq 0,102$	$\geq 0,118$	$\leq 0,350$	$\leq 0,360$	$\leq 0,40$	0,086–0,248	0,17–0,25
25Л	$\geq 0,142$	$\geq 0,158$	$\leq 0,414$	$\leq 0,416$	$\leq 0,43$	0,114–0,288	0,22–0,30
30Л	$\geq 0,185$	$\geq 0,199$	$\leq 0,456$	$\leq 0,416$	$\leq 0,45$	0,173–0,323	0,27–0,35
35Л	$\geq 0,227$	$\geq 0,226$	$\leq 0,499$	$\leq 0,475$	$\leq 0,45$	0,207–0,375	0,32–0,40

Сведения об авторах

Михневич Александра Сергеевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Столяров Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии и химических технологий Института металлургии, машиностроения и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: sam52.52@mail.ru

Юдин Данил Владиславович – магистрант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MECHANICAL PROPERTIES OF CAST STEEL OF DIFFERENT GRADES

Mikhnevich Alexandra S. – Master's student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Stolyarov Alexander M. – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the Department of Metallurgy and Chemical Technology, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sam52.52@mail.ru

Yudin Danil V. – Master's student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstracts. Cast steel was smelted in an electric arc furnace with a capacity of 25 tons. In the work, the mechanical properties of cast steel of 60 heats of steel grades 20L, 25L, 30L and 35L are determined. The chemical composition of the cast steel differed mainly in the content of carbon in the metal, and the difference in the content of other elements was insignificant. The following parameters of mechanical properties of steel were determined in the mechanical testing laboratory: yield strength, tensile strength, relative elongation, relative contraction, impact toughness and Brinell hardness. Using correlation analysis, a close relationship was established between the property parameters. Temporal strength has the strongest effect on all other parameters of mechanical properties. Correlation and regression analysis of the influence of each chemical element on the mechanical properties of steel allowed us to identify statistically significant linear dependencies of all the parameters of the properties on the carbon content in the metal. The carbon content values necessary to meet the requirements of the standard for mechanical properties were calculated. A narrowed range of carbon content in the smelted metal is recommended: from the minimum to the average values recommended by the standard. This will reduce the consumption of carbon-containing materials and shorten the duration of steel melting in an EAF.

Keywords: cast steel, chemical composition, carbon content, mechanical properties

Ссылка на статью:

Михневич А.С., Столяров А.М., Юдин Д.В. Механические свойства литейной стали разных марок // Теория и технология металлургического производства. 2025. №3(54). С. 26-30.

Mikhnevich A.S., Stolyarov A.M., Yudin D.V. Mechanical properties of cast steel of different grades. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 54, no. 3, pp. 26-30.