

УДК 669.14.018.295: 621.785.616

Рябикина М.А.¹, Иванова Т.Ю.², Ткаченко Н.В.³, Ставровская В. Е.⁴

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛИ ДЛЯ СУДОСТРОЕНИЯ

Предложен оптимальный состав стали GL-A36, обеспечивающий получение стабильных значений предела текучести, временного сопротивления и ударной вязкости.

К сталям для судостроения предъявляются повышенные требования по уровню прочности, свариваемости, сопротивляемости хрупкому разрушению. Сталь GL-A36 относится к категории сталей повышенной прочности и поставляется потребителю в состоянии после контролируемой прокатки. По требованиям Германского Ллойда листы толщиной 7-22 мм должны обладать следующим комплексом механических характеристик: $\sigma_{0,2} \geq 355$ МПа, $\sigma_B = 490-630$ МПа, $\delta_5 \geq 21$ %, $KV_{40} \geq 24$ Дж. Удовлетворение требований эксплуатационного характера должно гарантировать конструкциям корпуса необходимую прочность, неизменяемость формы в различных условиях внешних воздействий на него, а также долговечность службы и возможность ремонта корпуса в процессе эксплуатации судна. Известно [1], что существенное влияние на показатели прочностных, пластических характеристик и ударной вязкости при различных состояниях поставки стали оказывает плавочный химический состав. Требования Германского Ллойда к химическому составу судостроительной стали, %: $C_{max} = 0,18$; $Mn = 0,90-1,60$; $Si_{max} = 0,50$; $P_{max} = 0,035$; $S_{max} = 0,35$; $Al_{p-pmin} = 0,015$; $Nb = 0,02-0,05$; $V = 0,05-0,10$; $Ti_{max} = 0,02$; $Cu_{max} = 0,03$; $Cr_{max} = 0,20$; $Ni_{max} = 0,40$; $Mo_{max} = 0,08$.

Цель настоящей работы – определить рациональный для оптимизации механических свойств состав стали GL-A36.

В работе получены регрессионные модели прочностных свойств и ударной вязкости более 300 плавок стали GL-A36 в зависимости от химического состава. Для элементов, которые существенно определяют уровень прочности листовой стали GL-A36, построены обобщающие графики. Они позволяют не только проанализировать влияние химических элементов на механические свойства исследуемой стали, но и определить их оптимальное содержание, рис. 1. Серая полоса поля рисунка указывает наиболее приемлемое, на наш взгляд, содержание легирующих элементов.

Как известно [2], углерод оказывает монотонное упрочняющее влияние, которое связано с увеличением количества перлита и измельчением зерна. Регрессионные модели влияния углерода на прочностные свойства имеют вид: $\sigma_{0,2} = 275 + 1037 \cdot \%C$; $R^2 = 0,83$ и $\sigma_B = 470 + 687 \cdot \%C$; $R^2 = 0,76$. С увеличением содержания углерода от 0,05 до 0,20 % в стали, легированной микродобавками ниобия и ванадия, доля перлитной составляющей в структуре возрастает с 10 до 40 %. Упрочняющее влияние углерода сопровождается уменьшением значений ударной вязкости при комнатной и минусовых температурах, повышением порога хладноломкости, ухудшением свариваемости стали [3]. Для ударной вязкости в настоящей работе получена зависимость: $KCV_{+20} = 100 - 16 \cdot \%C$; $R^2 = 0,3$. Таким образом, снижение содержания углерода до ~0,14 % (рис. 1а) является одним из немногих мероприятий, улучшающих ударную вязкость в области вязкого и смешанного разрушения, а также переходную температуру хрупкого разрушения и свариваемость [4].

¹ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

²ОАО «МК «Азовсталь», инж.

³ПГТУ, аспирант

⁴ОАО «МК «Азовсталь», инж.

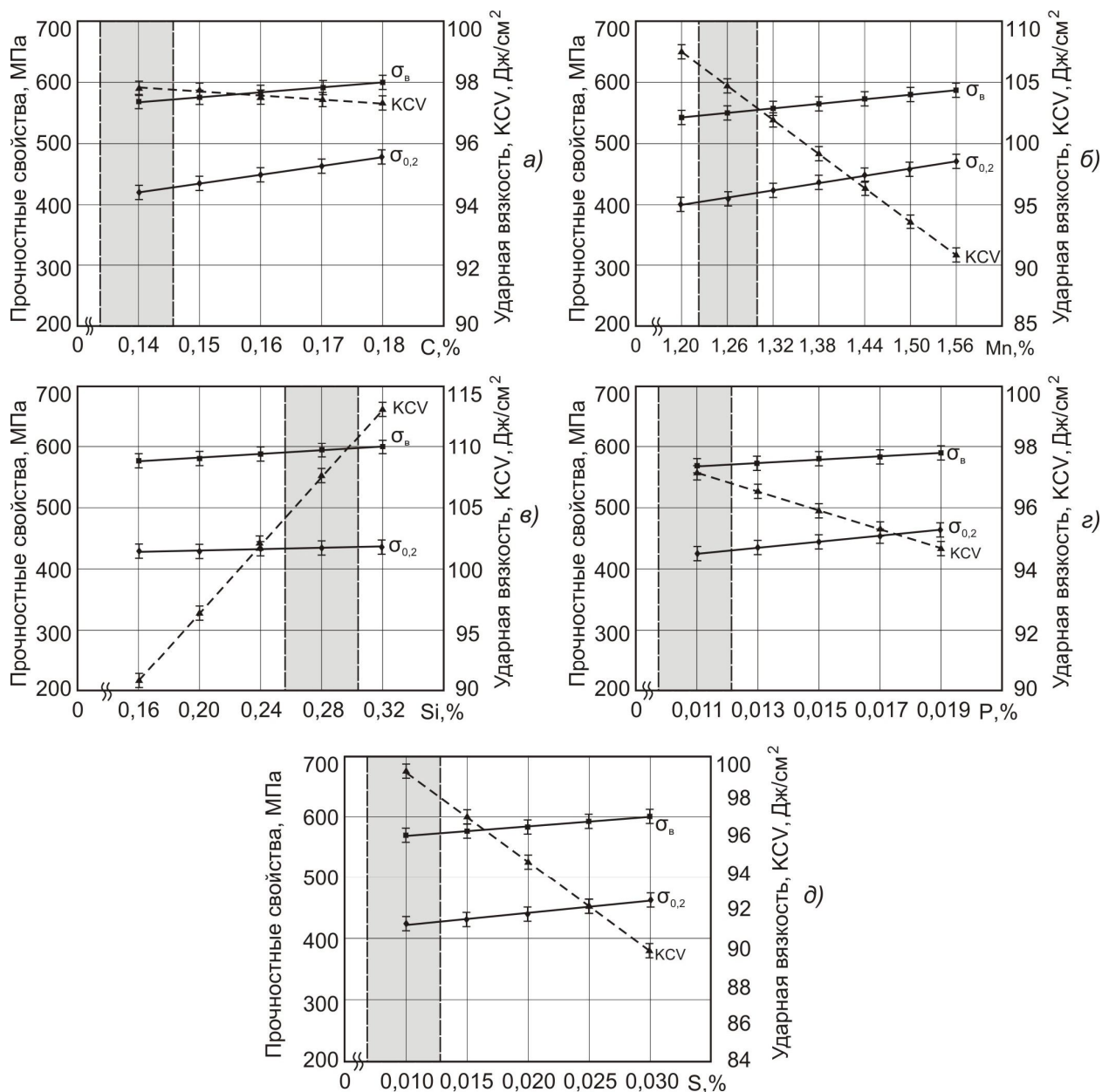


Рис. 1 – Влияние химического состава на механические свойства стали GL-A36:
а) углерод; б) марганец; в) кремний; г) фосфор; д) сера

Легирование марганцем также сопровождается упрочнением и одновременным снижением ударной вязкости – $\sigma_{0.2} = 210 + 156 \cdot \% \text{Mn}$; $R^2 = 0,83$ и $\sigma_B = 347 + 157 \cdot \% \text{Mn}$; $R^2 = 0,64$; $KCV_{+20} = 100 - 15 \cdot \% \text{Mn}$; $R^2 = 0,2$. Как известно, резкое ухудшение пластических характеристик происходит при содержании марганца более 2 % [5]. В стали с небольшим содержанием углерода введение марганца до 1,5 % повышает сопротивление хрупкому разрушению, поэтому оптимальное его содержание должно составлять ~1,26 %, как показано на рис.1, б. Зависимости механических характеристик стали GL-A36 от содержания кремния аппроксимируются выражением: $\sigma_{0.2} = 423 + 78 \cdot \% \text{Si}$; $R^2 = 0,83$; $\sigma_B = 347 + 157 \cdot \% \text{Si}$; $R^2 = 0,42$ и $KCV = 100 - 15 \cdot \% \text{Si}$; $R^2 = 0,2$. Кремний ухудшает показатели ударной вязкости и хладостойкости только при содержании его в стали свыше 0,8 % [6]. Поэтому при его концентрации ~0,28 %, как это видно из рисунка 1в, можно обеспечить удовлетворительное сочетание прочностных свойств и ударной вязкости стали. Сера и фосфор являются постоянными примесями в низколегированных сталях и их присутствие в них нежелательно [7]. Фосфор существенно

упрочняет феррит при одновременном снижении пластических и вязких свойств. Уравнения регрессии в этом случае имеют вид: $\sigma_{0,2} = 390 + 3097 \cdot \%P$; $R^2 = 0,7$ и $\sigma_B = 524 + 3320 \cdot \%P$; $R^2 = 0,51$; $KCV_{+20} = 100 - 268 \cdot \%P$; $R^2 = 0,2$. Известно, что фосфор относится к числу элементов, обладающих наибольшей склонностью к ликвации и образованию сегрегации по границам зерен. Поэтому его содержание в стали стараются снизить до минимального уровня. В результате расчетов установлено, что содержание фосфора в судостроительной стали должно составлять $\leq 0,013$ %, как показано на рис. 1г. Влияние серы на прочность описывается уравнениями: $\sigma_{0,2} = 423 + 1648 \cdot \%S$; $R^2 = 0,3$ и $\sigma_B = 556 + 1786 \cdot \%S$; $R^2 = 0,5$. Увеличение содержания серы сопровождается снижением пластичности и ударной вязкости – $KCV = 100 - 407 \cdot \%S$, $R^2 = 0,1$. С уменьшением содержания серы значение ударной вязкости повышается, наиболее интенсивно при ее содержании менее 0,01 %. Как видно из рис. 1г, оптимальное сочетание механических свойств наблюдается при содержании $\leq 0,01$ % серы.

Как показывает анализ, прочностные свойства листовой стали GL-A36 толщиной 20 – 40 мм после контролируемой прокатки наиболее тесно связаны с содержанием углерода, марганца, кремния, фосфора и в меньшей степени они зависят от содержания серы, алюминия и ниобия. С остальными элементами химического состава связь существенно слабее, или не обнаружена. Для ударной вязкости KCV_{+20} получены более низкие значения коэффициента достоверности аппроксимации R^2 , что свидетельствует о слабой корреляционной связи указанной характеристики и содержанием в стали C, Mn, Si, P и S. Таким образом, проведенное исследование влияния содержания элементов на механические свойства листовой стали категории GL-A36 в состоянии после контролируемой прокатки позволило получить математические зависимости, которые дают возможность стабилизировать уровень характеристик механических свойства листового проката путем определения наиболее благоприятного содержания легирующих элементов в стали. Рекомендовано следующее содержание указанных элементов в стали, которое обеспечит необходимый уровень механических свойств: 0,14 % C, 1,26 % Mn, 0,28 % Si, 0,010 % S, 0,011 % P. Исследования могут быть продолжены в направлении совершенствования химического состава, технологических параметров производства качественных сталей массового назначения.

Выводы

1. Получены парные математических модели и построены графики зависимости прочностных свойств и ударной вязкости от содержания химических элементов, которые позволяют рекомендовать усовершенствованный состав стали GL-A36.
2. Согласно полученным графическим зависимостям рекомендованное содержание элементов химического состава, обеспечивающее требуемый уровень механических характеристик, следующее: 0,07 % C, 1,3 % Mn, 0,35 % Si, 0,009% S, 0,013 % P.

Перечень ссылок

1. *Пилушенко В.Л.* Математическая модель механических свойств микролегированной феррито-перлитной стали / *В.Л. Пилушенко* // Сталь. – 2002. – № 8. – С. 97 – 102.
2. *Пикеринг Ф.Б.* Физическое металловедение и разработка сталей: Пер. с англ. / *Ф.Б. Пикеринг*. – М.: Металлургия, 1982. – 184 с.
3. Основы сварки судовых конструкций: Учебник / *С.Б. Андреев, В.С. Головченко, В.Д. Горбач, В.Л. Руссо*. – СПб.: Судостроение, 2006. – 552 с.
4. *Гладштейн Л.И.* Высокопрочная строительная сталь / *Л.И. Гладштейн, Д.А. Литвиненко*. – М.: Металлургия, 1972. – 240 с.
5. *Гудремон Э.* Специальные стали: Пер. с нем. / *Э. Гудремон*. – М.: ГНТИ, 1959. – Т. 1. – 952 с.
6. *Матросов Ю.И.* Сталь для магистральных газопроводов / *Ю.И. Матросов, Д.А. Литвиненко*. – М.: Металлургия, 1989. – 288 с.
7. *Лахтин Ю.М.* Материаловедение: Учебник / *Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева*. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

Рецензент: А.М. Скребцов
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 30.01.2009