

- plosive boromednenii / E.S. Vashuk [et al.] // Phizika I himiya obrabotki materialov. – 2011. – № 2. – P. 99-100. (Rus.)
10. Physico-chemical condition of the coating of stainless steel SUS316L deposited on the substrate of mild steel SS400 / A.D. Pogrebnyak [et al.] // Phizika metallov I metallovedenie. – 2004. – V. 97. – № 5. – P. 44-52. (Rus.)
 11. Formation of a defect structure in a near surface α -FE layer after high power ion beam exposure / A.D. Pogrebnyak [et al.] // Physica Status Solidi A. – 1991. – V. 123. – No.1. – P. 119-130.
 12. The thermal state of coating-substrate in a plasma finish hardening / P.A. Topolyansky [et al.] // Phizika I himiya obrabotki materialov. – 2011. – № 1. – P. 32-35. (Rus.)
 13. Fedun V.I. Dynamics of phase transformations by electron beam surface modification of metals and alloys / V.I. Fedun, Yu.E. Kolyada // Problems of Atomic Science and Technology. – 2010. – № 4. – P. 316-320.
 14. The use of a magnetic switch for commutation of high-current pulse circuits / Yu.E. Kolyada [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. – 2001. – V. 44. – № 2. – P. 213-214.

Рецензент: В.Г. Ефременко
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила: 03.11.2014

УДК 669.018.292

© Рябикина М.А.¹, Ставровская В.Е.²

КОМПЛЕКСНОЕ ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДА, НИОБИЯ И ВАНАДИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ S355N

Приводятся результаты математического моделирования комплексного влияния углерода, ниобия и ванадия на прочностные свойства и работу удара конструкционной листовой стали S355N. Определены оптимальные концентрации микролегирующих добавок, которые в сочетании с определенным содержанием углерода, позволят обеспечить требуемую прочность и работу удара $KV_{20\text{ °C}} \geq 40$ Дж.

Ключевые слова: микролегирование, концентрация, работа удара.

Рябікіна М.А., Ставровська В.Є. Комплексний вплив вуглецю, ніобію і ванадію на механічні властивості конструкційної сталі S355N. Наводяться результати математичного моделювання комплексного впливу вуглецю, ніобію і ванадію на властивості міцності та роботу удару конструкційної сталі S355N. Визначено оптимальні концентрації мікролегуючих добавок, які в поєднанні з певним вмістом вуглецю, дозволяють забезпечити необхідну міцність та роботу удару $KV_{20\text{ °C}} \geq 40$ Дж.

Ключові слова: мікролегування, концентрація, робота удару.

M.A. Ryabikina, V.Ye. Stavrovskaya. Complex influence of carbon, niobium and vanadium on the mechanical properties of the structural steel S355N. The role of microalloying additions of V, Nb, Ti manifested mainly as a result of their influence on the formation of substitution solid solution; dispersion, shape and distribution of the carbides (carbonitrides); the structure of boundaries and the fine structure of the grains; reducing the negative impact of harmful impurities. It is important to precise knowledge of the required number of microalloying elements in the steel. The objective of the present article is to review the role of Nb and V in micro-alloyed steel S355N and to know how does they

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, maryna.ryabikina@mail.ru

² инженер 1-ой категории прокатного отдела технологического управления ПАО «МК «Азовсталь», vera.stavrovskaya@azovstal.com.ua

affect on the mechanical properties. For this, the volume of the total population in 1340 heats of steel S355N has been divided into 3 sampling selection: the first - with a carbon content at the lower limit $C_{min} = 0,15\%$, the second - the upper limit $C_{max} = 0,20\%$ and the third - the average $C_{med} = 0,17\%$. The paper presents the results of mathematical modeling of complex influence of carbon, niobium and vanadium on the strength properties and impact toughness of sheet steel S355N. It has been established that the simultaneous increase of the content of carbon and niobium, carbon and vanadium causes an increase in yield strength and tensile strength. Carbon has a negligible influence on the impact strength $KV_{-20}^{\circ C}$ at constant of niobium and vanadium. Niobium with different carbon content positively affects on the impact strength, while vanadium - clearly negative. Increasing the vanadium content up to 0.06% when carbon content $C_{max} = 0,2\%$ leads to a drop in impact energy up to 23 J at which this value does not satisfy the requirements of EN 10025. The required by EN10025 level of strength $YTS \geq 355$ MPa; $UTS = 470-630$ MPa and low temperature-temperature toughness $KV_{-20}^{\circ C} \geq 40$ J will be achieved when the content: $C \approx 0,15\%$, $Nb \approx 0,04\%$, $V \approx 0,060\%$.

Keywords: microalloying, concentration, impact strength.

Постановка проблеми. Роль малых добавок V, Nb, Ti при микролегировании проявляется преимущественно в результате их воздействия на образование твердого раствора замещения; дисперсность, форму и распределение карбидов (карбонитридов); строение границ и тонкую структуру зерен; снижение отрицательного влияния вредных примесей. Отсюда важным является точное знание необходимого количества микролегирующих элементов в составе конструкционной стали.

Анализ последних исследований и публикаций. Разработке теоретических основ микролегирования посвящено большое количество работ [1-3], однако вопросы совместного влияния углерода, ванадия, ниобия, титана на прочность и низкотемпературную ударную вязкость конструкционных сталей в литературе изучены недостаточно, а о влиянии микролегирования ванадием на указанные характеристики приводятся противоречивые мнения.

Цель статьи. Целью данной работы является определение оптимального содержания микролегирующих добавок в низкоуглеродистой стали для обеспечения высокой прочности и нормированной работы удара на образцах с острым надрезом при температуре $-20^{\circ C}$.

Изложение основного материала. Сталь S355N изготавливают согласно техническим условиям поставки конструкционной свариваемой мелкозернистой стали в нормализованном состоянии EN 10025-3:2004. Обозначение стали S355N включает: символ S (для конструкционной стали); минимальный заданный предел текучести в МПа для толщин ≤ 16 мм; символа N, обозначающего условие поставки. Сталь должна иметь мелкозернистую структуру с эквивалентным показателем размера ферритного зерна ≥ 6 . Изделия должны поставляться в нормализованном или эквивалентном ему состоянии после нормализующей прокатки. Химический состав стали приведен в таблице. Требуемые механические свойства в поперечном направлении: $\sigma_{0,2} \geq 355$ МПа; $\sigma_b = 470-630$ МПа; $\delta_5 \geq 22\%$. Кроме того, при отсутствии других указаний, проверка значений работы удара должна выполняться на продольных образцах для испытаний и составлять: $KV_{-20}^{\circ C} \geq 40$ Дж.

Таблица

Химический состав по плавочному анализу нормализованной стали

According EN 10027-1	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Nb %	V %	Al %	Ti %	Cr %	Ni %	Mo %	Cu %	N %
	max	max	max	max	max	max	max	min	max	max	max	max	max	max
S355N	0,20	0,50	0,90÷1,65	0,030	0,025	0,05	0,12	0,02	0,05	0,30	0,50	0,10	0,55	0,015

В настоящей работе методами математического моделирования анализировалось совместное влияние углерода и ниобия, а также углерода и ванадия на прочностные свойства и работу удара стали S355N. Для этого генеральная совокупность объемом 1340 плавок разбивалась на 3 выборочные совокупности: первая – с содержанием углерода на нижнем пределе $C_{min} = 0,15\%$,

вторая – верхнем пределе $C_{max}=0,20\%$ и третья – средним $C_{med}=0,17\%$. Далее рассчитывались средние значения σ_b , $\sigma_{0,2}$ (МПа) и $KV_{-20^\circ C}$ (Дж) при различном содержании ниобия, но постоянном содержании углерода. Значения содержания Nb отсортировывались по возрастанию, и для всех повторяющихся концентраций находилось среднее из соответствующих показателей какого-либо механического свойства. По полученным усредненным данным строились графики зависимости определенной механической характеристики стали от содержания микролегирующего элемента (Nb, V). Результаты расчетов для $\sigma_{0,2}$ и $KV_{-20^\circ C}$ приведены на рисунке 1.

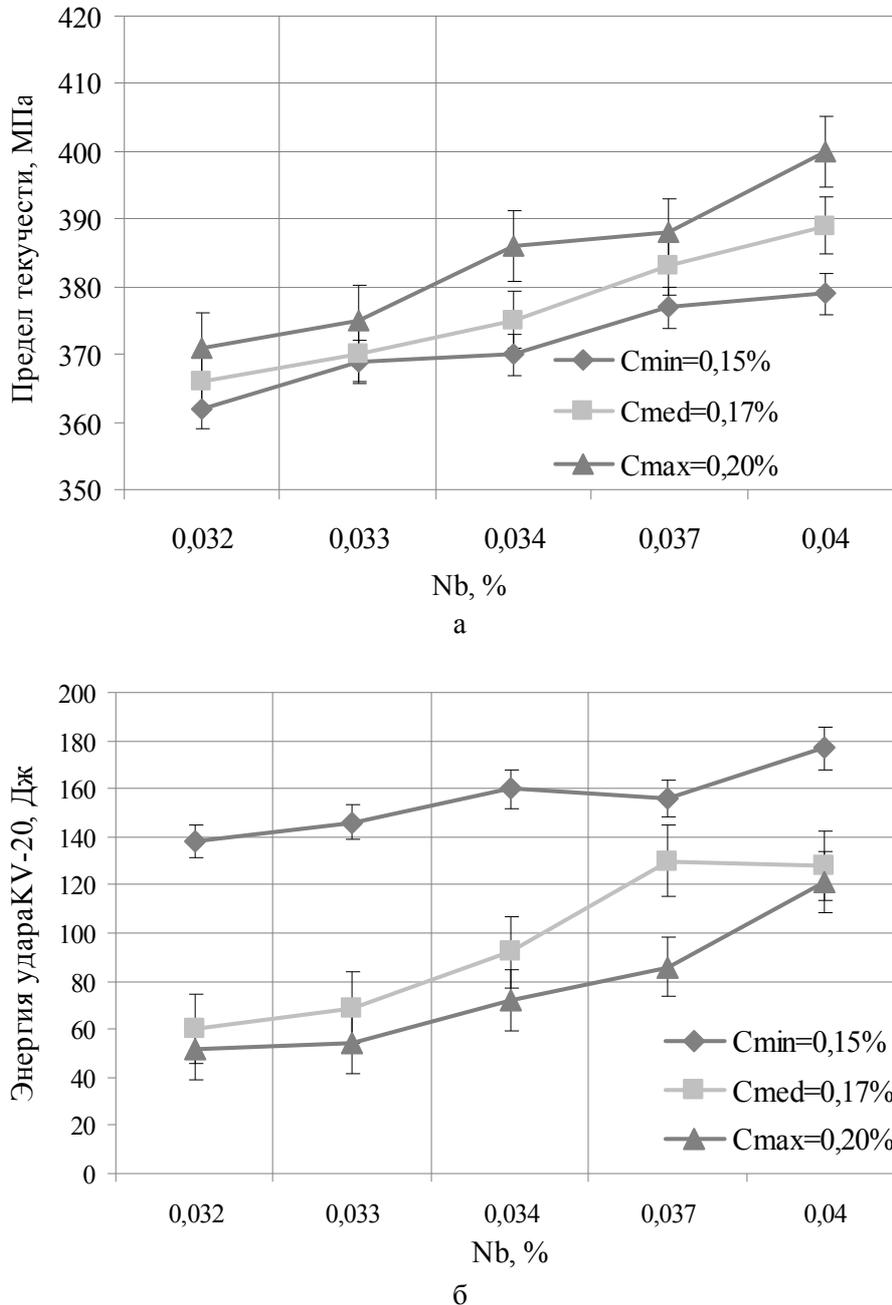


Рис. 1 – Влияние ниобия на предел текучести (а) и работу удара (б) стали S355N

Совместное влияние ниобия и углерода представлено на рис. 1 а. Оба элемента оказывают положительное влияние на прочность стали. С увеличением плавочного содержания Nb от 0,032 до 0,04 % (на 0,08 %) в стали S355N предел текучести возрастает от 365 до 390 МПа, а предел прочности от 530 до 580 МПа для $C_{med} = 0,17\%$. Увеличение плавочного содержания углерода вызывает последовательное смещение кривых вверх и в случае, когда концентрация

углерода и ниобия достигает верхнего предела: $C_{\max}=0,20\%$ и $Nb_{\max}=0,04\%$, наблюдается максимум прочности - $\sigma_{0,2}=400$ МПа, а $\sigma_b=590$ МПа.

Влияние углерода на энергию удара противоположно его влиянию на прочность стали. Так, например, верхнее положение на графике занимает кривая $KV=f(\%Nb)$ для $C_{\min}=0,15\%$, за ней в сторону снижения располагается кривая для $C_{\text{med}}=0,17\%$; нижнее положение – у кривой для $C_{\max}=0,20\%$. Расстояние между кривыми по оси ординат составляет ~ 60 и более Дж. Если работа удара $KV_{-20^\circ C}$ для C_{\min} изменяется в диапазоне от 140 до 180 Дж, то интервал изменения $KV_{-20^\circ C}$ для C_{\max} - от 50 до 120 Дж. На графике, рис. 1 б, отсутствуют «провалы» в значениях работы удара. Все кривые монотонно возрастают при увеличении содержания Nb в стали. Максимум работы удара $KV_{-20^\circ C} \sim 180$ Дж соответствует $C_{\min}=0,15\%$ и $Nb_{\max}=0,04\%$.

Комплексное влияние ванадия и углерода представлено на рис. 2.

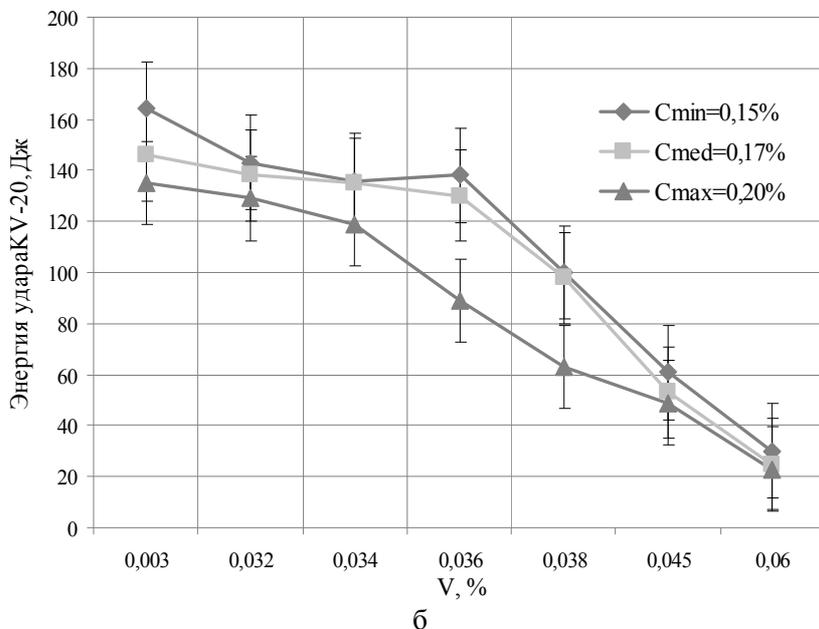
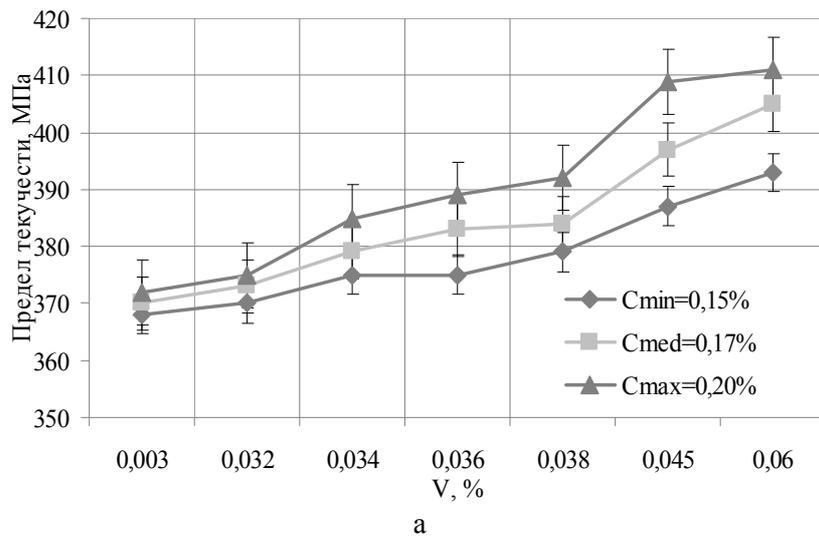


Рис. 2 – Влияние ванадия на предел текучести (а) и работу удара (б) стали S355N

Следует отметить, что плавочное содержание ванадия не превышало 0,06 %. Зависимость прочности стали от содержания углерода и ванадия прямая: кривые $\sigma_b=f(\%V)$ и $\sigma_{0,2}=f(\%V)$ плавно поднимаются вверх в направлении увеличения концентрации углерода и имеют положительный тангенс угла наклона к оси абсцисс, рис. 2, а. Максимум прочностных свойств

$\sigma_{0,2}=410$ МПа, а $\sigma_b=590$ МПа имеет место при $C_{\max}=0,20$ % и $V_{\max}=0,06$ %. Таким образом, комплексное влияние углерода и ванадия на прочностные свойства стали аналогично влиянию углерода и ниобия. С увеличением содержания углерода в стали, микролегированной добавками ниобия и ванадия, доля перлита в структуре возрастает, следовательно, повышается предел прочности и предел текучести [3].

Влияние ванадия на работу удара показано на рисунке 2, б. Ванадий оказывает явное негативное влияние на данную характеристику. Увеличение содержания ванадия до 0,06 % при содержании углерода $C_{\max}=0,2$ % приводит к падению энергии удара до 23 Дж, при котором это значение не удовлетворяет требования EN 10025. При этом изменение содержания углерода существенно картину не меняет – настолько сильно отрицательное влияние ванадия на работу удара и следовательно хладостойкость стали. Концентрация $V \leq 0,035$ % обеспечит требуемый уровень работы удара $KV_{-20} \text{ } ^\circ\text{C} \geq 40$ Дж в стали S355N при всех колебаниях плавочного содержания углерода. Таким образом, уменьшение содержания ванадия до $V=0,035$ % и снижение содержания углерода является одним из немногих мероприятий, одновременно улучшающих в конструкционной стали: способность к пластической деформации в холодном состоянии при статическом и динамическом нагружениях, энергию удара, переходную температуру хрупкого разрушения и свариваемость.

В результате проведенных аналитических исследований рекомендуемая концентрация углерода и микролегирующих элементов в стали S355N, которая обеспечит требуемый уровень механических характеристик $\sigma_{0,2} \geq 355$ МПа; $\sigma_b = 470-630$ МПа; $KV_{-20} \text{ } ^\circ\text{C} \geq 40$ Дж, следующая: $C \leq 0,17$ %; $Nb = 0,03-0,05$ %; $V \leq 0,035$ %.

Выводы

1. В работе изучено совместное влияние углерода и ниобия, а также углерода и ванадия на прочностные свойства и ударную вязкость стали S355N. Установлено, что одновременное увеличение содержания углерода и ниобия, а также углерода и ванадия вызывает увеличение σ_b и $\sigma_{0,2}$. Углерод оказывает незначительное влияние на работу удара при постоянном содержании ниобия и ванадия. Ниобий при различном содержании углерода положительно влияет на работу удара, в то время как ванадий – явно отрицательно. При содержании углерода и ванадия на верхнем пределе работа удара значительно уменьшается.

2. Требуемый EN10025 уровень прочности $\sigma_{0,2} \geq 355$ МПа; $\sigma_b = 470-630$ МПа и низкотемпературной ударной вязкости $KV_{-20} \text{ } ^\circ\text{C} \geq 40$ Дж будет достигнут при содержании: $C \approx 0,15$ %, $Nb \approx 0,04$ %, $V \approx 0,060$ %.

Список использованных источников:

1. Baker T.N. Processes, microstructure and properties of vanadium microalloyed steels / T.N. Baker // Materials Science and Technology. – 2009. – Vol. 25, № 9. – P. 1083-1107.
2. Rassizadehghani J. Mechanical Properties of V-, Nb-, and Ti-bearing As-cast Microalloyed Steels / J. Rassizadehghani, H. Najafi, M. Emamy and G. Eslami-Saeen // J. Mater. Sci. Technol. – 2007. – Vol. 23, № 6. – P. 779-784.
3. The Role Of Vanadium In Microalloyed Steels / R. Lagneborg [et al.]. – Stockholm : Swedish Institute for Metals Research, 1999. – 86 p.

Bibliography:

1. Baker T.N. Processes, microstructure and properties of vanadium microalloyed steels / T.N. Baker // Materials Science and Technology. – 2009. – Vol. 25, № 9. – P. 1083-1107.
2. Rassizadehghani J. Mechanical Properties of V-, Nb-, and Ti-bearing As-cast Microalloyed Steels / J. Rassizadehghani, H. Najafi, M. Emamy and G. Eslami-Saeen // J. Mater. Sci. Technol. – 2007. – Vol. 23, № 6. – P. 779-784.
3. The Role Of Vanadium In Microalloyed Steels / R. Lagneborg [et al.]. – Stockholm : Swedish Institute for Metals Research, 1999. – 86 p.

Рецензент: В.Г. Ефременко
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ЛГТУ»

Статья поступила 10.11.2014