

3. Zhudra A.P. Naplavochnye poroshkovye provoloki [Powder strips for hardfacing]. *Avtomatischeckaya svarka – Automatic Welding*, 2012, no.1, pp. 39-44. (Rus.)
4. Vorobliov V.V., Malinov V.L. Splavy I materialy dlya naplavki kontaktnykh poverhnostei uravnitel'nykh klapanov [Alloys and materials for hardfacing contact surfaces of valves]. *Vestnik Donbasskoi gosudarstvennoi mashinostroitel'noi akademii – Herald of the Donbass State Engineering Academy*, 2010, no.2(19), pp. 64-68.
5. Malinov V.L., Chigarev V.V., Vorobev V.V. Novyie poroshkovyie lentyi dlya naplavki detaley, rabotayuschih v usloviyah abrazivnogo i gazoabrazivnogo vozdeystviya [New powder strips for hardfacing of parts working under conditions of abrasive and gas-abrasive wear]. *Zaschita metallurgicheskikh mashin ot polomok – Protection of metallurgical machines from breakdowns*, 2012, no.14, pp. 252-258. (Rus.)
6. Livshitz L.S., Grinberg N.A., Kurkumelli E.G. *Osnovy legirovaniya naplavlennogo metalla* [The basement of alloying of weld deposited metal]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 260 p. (Rus.)
7. Borle S. Microstructural characterization of chromium carbide overlays and a study of alternative welding processes for industrial wear applications. Thesis for Master of Science, University of Alberta, 2014. 159 p.
8. Barnes N., Borle S., Mendez P.F. Large anomalous features in the microstructure of chromium carbide weld overlays, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2017, vol. 22, iss. 7, pp. 595-600.
9. Fang C.M., van Huis M.A., Zandbergen H.W. Structural, electronic, and magnetic properties of iron carbide  $Fe_7C_3$  phases from first-principles theory. *Phys. Rev. B*, 2009, iss. 80(22), pp. 1-9.
10. Pierson H.O. Handbook of Refractory Carbides and Nitrides. Properties, Characteristics, Processing and Applications. Noyes Publ., 1996. 362 p.

Рецензент: В.М. Матвієнко  
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 25.10.2017

УДК 669.018.292

© Рябікіна М.А.<sup>1</sup>, Ставровська В.Є.<sup>2</sup>, Ксеніта М.А.<sup>3</sup>

### ЗАВИСИМОСТИ «СОСТАВ-СВОЙСТВО» ДЛЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ S355J2

*Выполнена статистическая обработка массива данных приемо-сдаточных испытаний листовой стали S355J2 после нормализующей прокатки. Построены зависимости «состав-свойство». Приводятся результаты влияния ванадия и ниобия на прочностные свойства и энергию удара конструкционной листовой стали S355J2.*

**Ключевые слова:** микрولةгирование, нормализующая прокатка, упрочнение.

**Рябікіна М.А., Ставровська В.Є., Ксеніта М.А. Залежності «склад-властивість» для низьколегованої сталі S355J2.** Виконана статистична обробка масиву даних приймально-здавальних випробувань листової сталі S355J2 після нормалізуючої прокатки. Побудовано залежності «склад-властивість». Наводяться результати впливу ванадію і ніобію на властивості міцності і енергію удару конструкційної листової сталі S355J2.

**Ключові слова:** мікрولةгування, нормалізуючи прокатка, зміцнювання.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [maruqa.ryabikina@gmail.com](mailto:maruqa.ryabikina@gmail.com)

<sup>2</sup> инженер 1-ой категории прокатного отдела технологического управления ПАО «МК «Азовсталь», [vera.stavrovskaya@azovstal.com.ua](mailto:vera.stavrovskaya@azovstal.com.ua)

<sup>3</sup> студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [kse-  
nia.brokker@gmail.com](mailto:kse-<br/>nia.brokker@gmail.com)

*M.A. Ryabikina, V.Ye. Stavrovskaya, M.O. Ksenita. Composition-property relationships for low alloyed S355J2 steel. The effects of vanadium and niobium microalloying on the microstructure and mechanical properties of structural steel have been studied. In low carbon steel containing vanadium and niobium, the contribution to hardening of the following mechanisms increases: grain refinement, hardening by dispersed precipitates of carbides and nitrides, dislocation hardening. These chemical elements refine the grains, enhance microstructure uniformity and mechanical properties of low alloyed steel. In the present work, statistical analysis of the acceptance testing results of the normalized rolled S355J2 steel has been performed. The sampling amounts to 15619 meltings. The meltings were divided into 2 parts: the first included the melting alloyed with vanadium, the second included the melting alloyed with niobium. The minimum yield strength was 373 MPa for melts with vanadium and 400 MPa for melts with niobium, which is higher than the required by 20-40 MPa. The values of the tensile strength fit into the required interval 470-630 MPa. The average values are ~545 MPa. The minimum values of the KV<sub>20</sub> impact energy are 3-4 times higher than the required 27 J. The average values of KV<sub>20</sub> (with vanadium) = 159 J and KV<sub>20</sub> (with niobium) = 168 J. Thus, steel S355J2 is characterized by a stable and high complex of mechanical characteristics. Tensile test and Charpy test at negative temperatures show good combinations of strength and ductility due to microalloying additions. In this paper the composition-property relationships are also shown:  $\sigma_{0,2} = 392\%V + 408$  (MPa),  $R = 0,4$ ;  $KV_{20} = 583\%V + 134$  (J),  $R=0,35$ ;  $\sigma_{0,2} = 692\%Nb + 402$  (MPa),  $R = 0,46$ ;  $KV_{20} = 1204\%V + 130$  (J),  $R = 0,52$ . Microalloying with just vanadium in amounts of 0,01-0,10% or only with niobium 0,01-0,05% increases the yield strength of S355J2 steel by ~30 Mpa, the impact energy is increased by ~40 J. From the obtained «composition-property» models it follows that niobium has a more significant influence on the mechanical characteristics of S355J2 steel.*

**Keywords:** microalloying, normalized rolling, hardening.

**Постановка проблеми.** Микролегирование – одно из современных направлений разработки составов сталей для металлических конструкций. Основными преимуществами проката из этих сталей являются сочетание высокой прочности и сопротивления хрупкому разрушению, сокращение затрат из-за отсутствия дополнительной термической обработки, снижение веса металлоконструкций. В связи с этим вопросы совершенствования химического состава конструкционных сталей и режимов термомеханической прокатки, включая ускоренное охлаждение, являются актуальными.

**Цель статьи** – изучение влияния ванадия и ниобия на прочностные свойства и энергию удара металлопроката из конструкционной стали S355J2.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Закономерностям изменения механических свойств, склонности к хрупкому разрушению при введении в сталь малых добавок титана, ванадия, ниобия посвящено большое количество работ [1-4]. Авторы настоящей работы ранее также публиковали исследования по данной теме [5, 6]. При микролегировании возрастает вклад в упрочнение следующих механизмов: измельчения зерна, упрочнения дисперсными выделениями карбидов и нитридов, дислокационного упрочнения. Микролегирование оказывает также положительное влияние на химическую и структурную гомогенность стали.

В литературе отсутствуют конкретные данные о раздельном влиянии V и Nb на механические свойства стали S355J2 после нормализующей прокатки.

**Изложение основного материала.** В работе выполнен статистический анализ результатов прямо-сдаточных испытаний 15619 плавок стали S355J2+N. Исходный массив данных был разделен на 2 выборки: в первую вошли плавки, легированные только ванадием, во вторую – только ниобием. Объем указанных выборок примерно одинаков. Для каждой выборки в Excel с помощью вкладки Анализ данных, Описательная статистика рассчитаны статистические показатели свойств. Методика построения зависимостей «состав-свойство» подробно описана в [7].

Листовой прокат из стали S355J2 производится согласно EN10025:2007 и другой нормативно-технической документации. Буква S означает «Structural steel» – конструкционная сталь; 355 – минимальное значение  $\sigma_{0,2}$ , МПа; J2 – испытания на удар по Шарпи при  $-20^{\circ}\text{C}$ ; +N – ус-

ловіе поставки (нормализация/нормализующая прокатка).

Прокат из стали S355J2 предназначен для изготовления строительных металлоконструкций, таких как:

- элементы мостов и морских сооружений;
- электростанции;
- горно-шахтное и землеройное оборудование;
- погрузочно-разгрузочное оборудование;
- ветряные башни и др.

Примером использования металлопроката из стали S355J2+N в строительстве коммерческих зданий является самый дорогостоящий проект отеля Abraj Al-Bait (Саудовская Аравия), который принадлежит к списку небоскребов-рекордсменов мира. Самая высокая башня отеля - Makkah Royal Clock Tower Hotel («Королевская часовая башня») высотой 601 м, построена из листовой стали S355J2, рис. 1.



Рис. 1 – Башня Makkah Royal Clock Tower Hotel, изготовленная из листовой стали S355J2+N

В таблицах 1 и 2 представлены требования EN10025:2007 к химическому составу и механическим свойствам стали S355J2.

Таблица 1

Химический состав стали

Марка стали	Толщина, мм	Химический состав, %					
		C	Mn	P	S	Si	Cu
S355J2	<40	0,20 max	1,60 max	0,025 max	0,025 max	0,55 max	0,55 max

Таблица 2

Требования EN10025:2007 к механическим свойствам

Марка стали	Толщина, мм	Механические свойства	
		Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
S355J2	<16	355 min	470-630

Схема производства проката включает в себя выплавку стали в кислородном конвертере, внепечную обработку, разливку стали на МНЛЗ, нормализующую прокатку, отделку проката и контроль качества.

Современными процессами производства стального листа являются контролируемая прокатка, нормализующая прокатка, контролируемая прокатка с последующим ускоренным охлаждением, рис. 2.

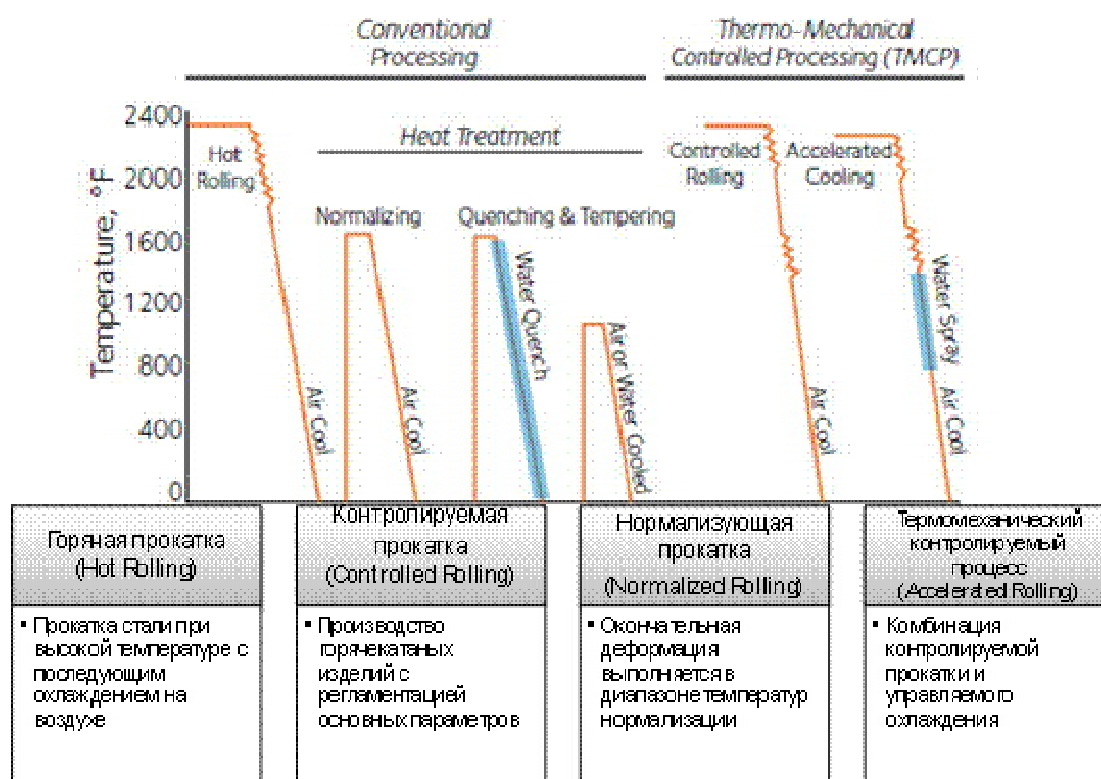


Рис. 2 – Схемы производства листового проката

Из 15619 плавков стали S355J2, подвергнутых статистическому анализу, отсортировано 5, что составило 0,03% от годового объема металлопроката. Причина отсортировки – получение при испытаниях пониженных значений предела текучести. В указанных плавках отсутствовал ниобий, а количество ванадия находилось на нижнем пределе. На рисунке 3 представлены средние, минимальные и максимальные значения для предела текучести, предела прочности и энергии удара стали S355J2, легированной ванадием и ниобием соответственно.

Как видно, минимальные значения предела текучести равны 373 МПа для плавков с ванадием и 400 МПа для плавков с ниобием, что выше требуемых 355 МПа на 20-40 МПа. Средние значения  $\sigma_{0,2}$  для двух вариантов легирования примерно одинаковы  $\sim 425$  МПа, а максимальные  $\sigma_{0,2 \max} = 495$  МПа для плавков с V и  $\sigma_{0,2 \max} = 460$  МПа – для плавков, легированных Nb. Разность между максимальным и минимальным значениями предела текучести в плавках с V составляет 122 МПа, что в 2 раза больше, чем с Nb – 60 МПа.

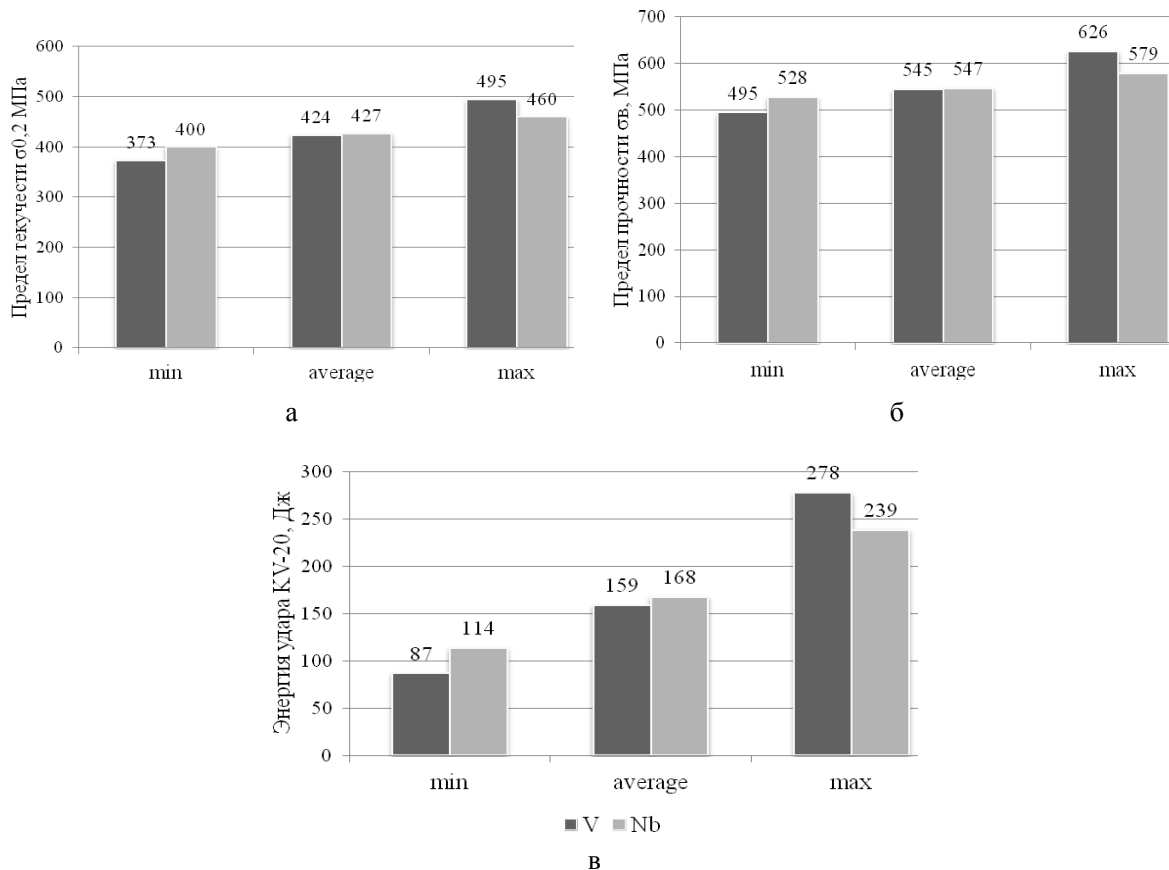


Рис. 3 – Влияние химического состава на механические свойства стали S355J2: а – предел текучести; б – предел прочности; в – энергия удара

Для предела прочности имеет место аналогичная ситуация: минимальные значения  $\sigma_B = 373$  и  $400$  МПа, а максимальные –  $626$  и  $579$  МПа (в плавках с V и Nb соответственно), что укладывается в требуемый интервал для  $\sigma_B = 470-630$  МПа. Средние значения  $\sigma_B = 545-547$  МПа.

Минимальные значения энергии удара KV<sub>20</sub> в 3-4 раза превосходят требуемые 27 Дж. Средние значения KV<sub>20</sub> (с V) = 159 Дж и KV<sub>20</sub> (с Nb) = 168 Дж. Таким образом, металлопрокат из стали S355J2 характеризуется стабильным и высоким комплексом механических характеристик.

В настоящей работе также построены зависимости «состав-свойство», рис. 4-5. Как видно, плавочные колебания концентрации ванадия составляют 0,05-0,094%, концентрация ниобия изменяется в пределах 0,012-0,047%. Уравнения линейной регрессии имеют вид (1-4):

$$\sigma_{0,2} = 392\%V + 408 \text{ (МПа)}, R = 0,4; \quad (1)$$

$$KV_{20} = 583\%V + 134 \text{ (Дж)}, R = 0,35; \quad (2)$$

$$\sigma_{0,2} = 692\%Nb + 402 \text{ (МПа)}, R = 0,46; \quad (3)$$

$$KV_{20} = 1204\%Nb + 130 \text{ (Дж)}, R = 0,52. \quad (4)$$

В моделях линейного вида коэффициент регрессии, стоящий перед аргументом, равен тангенсу угла наклона линии регрессии к оси абсцисс. Следовательно, влияние Nb на величину  $\sigma_{0,2}$  в  $\sim 1,8$  раза сильнее, чем V. Для энергии удара имеет место аналогичная зависимость. Интересным является тот факт, что свободные члены в уравнениях регрессии примерно одинаковы и равны  $\sim 405$  МПа для  $\sigma_{0,2}$  и  $\sim 132$  Дж для KV<sub>20</sub>. Физический смысл свободного члена уравнения регрессии состоит в том, что он численно равен значению функции при нулевом значении аргумента. Значения коэффициентов парной корреляции находятся в интервале  $R = 0,35-0,52$ , что можно объяснить следующим:

- большой массив исходных данных;
- узкие интервалы варьирования V и Nb в пределах их плавочного содержания;
- стабильность технологии производства листового проката.

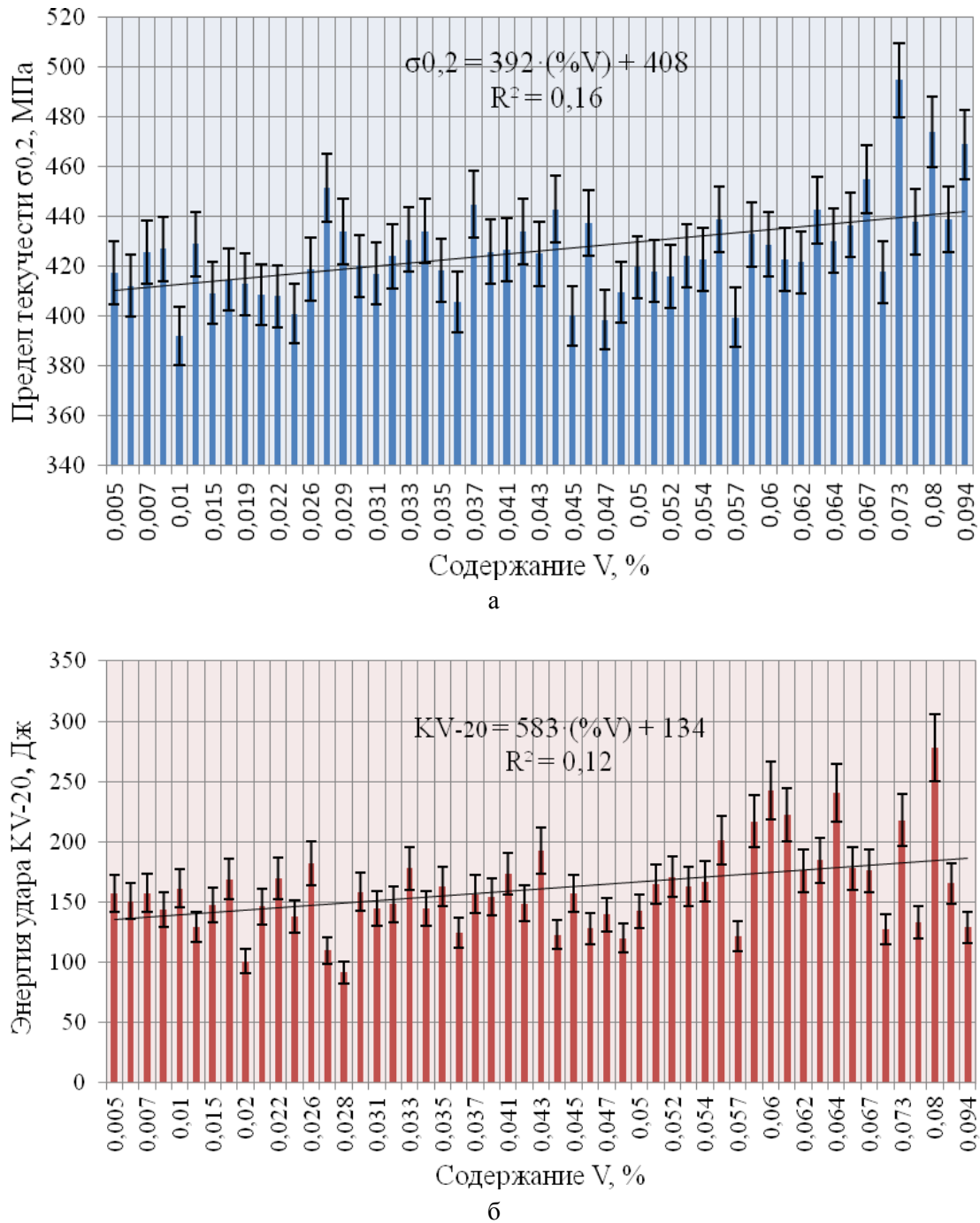


Рис. 4 – Влияние ванадия на предел текучести (а) и работу удара (б) стали S355J2

Проверка нулевой гипотезы по t-критерию Стьюдента показала, что выборочные коэффициенты корреляции значительно отличаются от нуля, предел текучести и энергия удара связаны с концентрацией V и Nb линейной зависимостью. Ниобий, в сравнении с ванадием, оказывает более существенное влияние на комплекс механических характеристик. Для получения гарантированного уровня прочности после нормализующей прокатки рекомендовано введение в сталь S355J2 ниобия  $\geq 0,04\%$  или ванадия  $\geq 0,08\%$ . Предложенные модели «состав-свойство» можно использовать для анализа качества и прогнозирования механических свойств конструкционной стали S355J2. Направлением дальнейших исследований является определение численных соотношений концентрации ванадия, ниобия, углерода и азота для получения при последующей термомеханической обработке фазового состава стали, обуславливающего оптимальное сочетание прочности и вязкости.

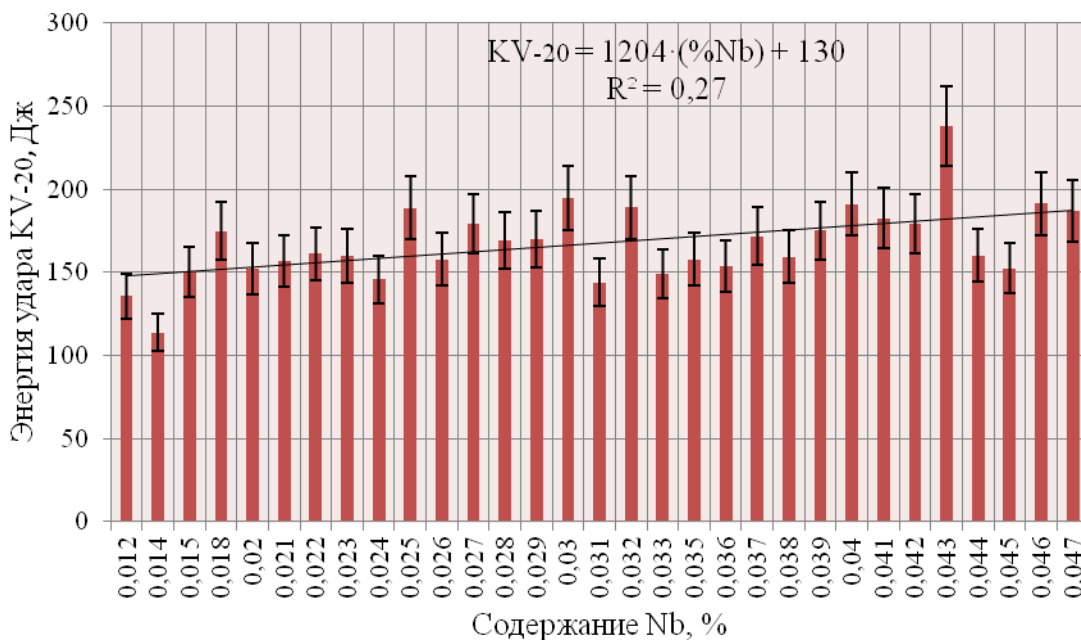
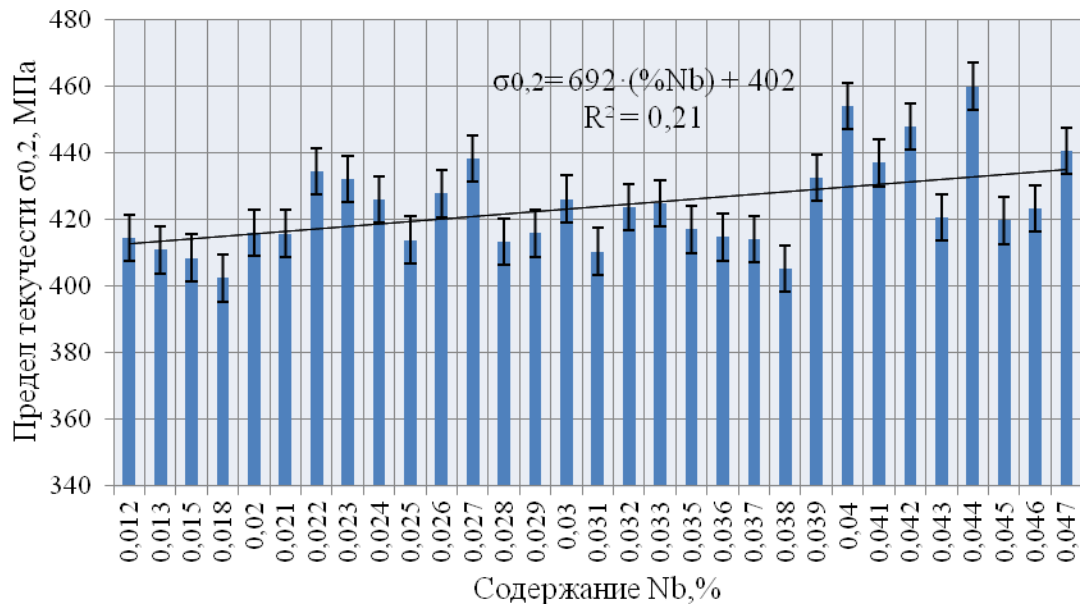


Рис. 5 – Влияние ниобия на предел текучести (а) и работу удара (б) стали S355J2

### Выводы

1. Методом статистического анализа установлено, что легированная ванадием и ниобием сталь S355J2 обладает высокой стабильностью механических характеристик:  $\min \sigma_{0,2} > 355$  МПа и  $\sigma_B = 470-630$  МПа, энергия удара  $KV_{-20 \min} = 90$  Дж, а средний уровень механических свойств листового проката превышает требования EN10025:2007 для 355 класса прочности.
2. Микролегирование стали S355J2 только ванадием в количестве 0,01-0,10% или только ниобием 0,01-0,05% обуславливает увеличение предела текучести на ~30 МПа, энергии удара – на ~40 Дж.
3. Из полученных моделей «состав-свойство» следует, что ниобий оказывает более значимое влияние на механические характеристики стали S355J2. Рекомендовано содержание ванадия и ниобия, позволяющее достигать стабильно высокого комплекса механических характеристик металлопроката.

**Список использованных источников:**

1. Матросов Ю.И. Сталь для магистральных газопроводов / Ю.И. Матросов, Д.А. Литвиненко, С.А. Голованенко. – М. : Metallurgia, 1989. – 288 с.
2. Пикеринг Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей : монография / Ф.Б. Пикеринг. – М. : Metallurgia. – 1982. – 184 с.
3. Гольдштейн М.И. Дисперсионное упрочнение низколегированных конструкционных сталей / М.И. Гольдштейн // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1975. – № II. – С. 50-59.
4. The Role Of Vanadium In Microalloyed Steels / R. Lagneborg [et al.]. – Stockholm : Swedish Institute for Metals Research, 1999. – 86 p.
5. Влияние толщины листового проката из стали S355NL на механические свойства / М.А. Рябикина [и др.] // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2012. – Вип. 24. – С. 121-125. – (Серія: Технічні науки).
6. Рябикина М.А. Комплексное влияние углерода, ниобия и ванадия на механические свойства конструкционной стали S355N / М.А. Рябикина, В.Е. Ставровская // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2014. – Вип. 29. – С. 80-84. – (Серія: Технічні науки).
7. Рябикина М.А. Математическое моделирование влияния химического состава на механические свойства конструкционной стали S355N / М.А. Рябикина, Н.В. Ткаченко, В.Е. Ставровская // 7-я международная научно-практическая интернет-конференция. Проблемы и перспективы развития науки в начале 3-го тысячелетия в странах СНГ: Сб. тр. – Переяслав-Хмельницкий, 2013. – С. 121-127.

**References:**

1. Matrosov Yu.I., Litvinenko D.A., Golovanenko S.A. *Stal' dlya magistralnykh gazoprovodov* [Steel for gas mains]. Moscow, Metallurgia Publ., 1989. 288 p. (Rus.)
2. Piking F.B. *Fizicheskoe metallovedenie i razrabotka staley: Monografiya* [Physical metallurgy and development of steels: Monograph]. Moscow, Metallurgia Publ., 1982. 184 p. (Rus.)
3. Gol'dshteyn M.I. Dispersionnoe uprochnenie nizkolegirovannykh listovykh staley [Dispersion hardening of low alloy structural steels]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metal science and heat treatment of metals*, 1975, no.2, pp. 50-59 (Rus.)
4. Lagneborg R., Siwecki T., Zajac S., Hutchinson B. The Role Of Vanadium In Microalloyed Steels. Stockholm, Swedish Institute for Metals Research Publ., 1999. 86 p.
5. Ryabikina M.A., Tkachenko F.K., Ivanova T.Ju., Stavrovskaja V.E. Vliyanie tolshiny listovogo prokata iz stali S355NL na mehanicheskie svoystva [The influence of the thickness of rolled sheets and plates, made of steel S355NL on the mechanical properties]. *Visnik Priazov'skogo derzgvavnogo tehnicnogo universitetu. Seria: Tehnicni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2012, iss. 24, pp. 121-125. (Rus.)
6. Ryabikina M.A., Stavrovskaja V.E. Kompleksnoe vliyanie ugleroda, niobiya i vanadiya na mehanicheskie svoystva konstrukzionnoy stali S355N [Complex influence of carbon, niobium and vanadium on the mechanical properties of structural steel S355N]. *Visnik Priazov'skogo derzgvavnogo tehnicnogo universitetu. Seria: Tehnicni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2014, iss. 29, pp. 80-84. (Rus.)
7. Ryabikina M.A., Tkachenko N.V., Stavrovskaja V.E. *Matematicheskoe vodelirovanie vliyaniya himicheskogo sostava na mehanicheskie svoystva stali S355N. Anotatii dopovidei 7 Mizhn. nauk.-prakt. konf. «Problemy i perspektivy razvitiya nauki v nachale 3 tysyacheletiya v stranah SNG»* [Mathematical modeling of the effect of chemical composition on the mechanical properties of structural steel S355N. Abstracts of 7<sup>th</sup> Int. Sci.-Pract. Conf «Problems and prospects of science development at the beginning of the 3rd millennium in the CIS countries»]. Pereyaslav-Khmelnizkiy, 2013, pp. 121-127. (Rus.)

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

Статья поступила 10.08.2017