

УДК 669.017.07

©Рябікіна М.А.¹, Ткаченко Ф.К.², Іванова Т.Ю.³, Ставровська В.Е.⁴**ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ СТАЛИ S355NL НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

Исследовано влияние толщины листов нормализованных сталей S355NL, легированных ниобием, а также ниобием и ванадием на механические свойства. Установлено, что с увеличением толщины листов от 20 до 120 мм уровень механических характеристик плавно снижается. Введение в сталь ванадия обуславливает повышение прочностных характеристик стали, но снижает работу удара при отрицательных температурах испытания.

Ключевые слова: механические свойства, толщина листов, микролегирование.

Рябікіна М.А., Ткаченко Ф.К., Іванова Т.Ю., Ставровська В.Е. Вплив товщини листового прокату із сталі S355NL на механічні властивості. Досліджено вплив товщини листів нормалізованих сталей S355NL, легованих ніобієм, а також ніобієм і ванадієм на механічні властивості. Встановлено, що зі збільшенням товщини листів від 20 до 120 мм рівень механічних характеристик плавно знижується. Введення в сталь ванадію обумовлює підвищення міцності сталі, але знижує роботу удару при негативних температурах випробування.

Ключові слова: механічні властивості, товщина листів, мікролегування.

M.A. Ryabikina, F.K. Tkachenko, T.Yu. Ivanova, V.E. Stavrovskaya. The influence of the thickness of rolled sheets and plates, made of steel S355NL on the mechanical properties. The influence of plate thickness normalized steels S355NL, alloyed with niobium, and niobium and vanadium on the mechanical properties was investigated. It was found that with the increase of plate thickness from 20 to 120 mm the level of mechanical properties of continuously decreased. The introduction of vanadium into steel causes the increase of the strength characteristics of steel, but it reduces the work of impact test at low temperatures.

Key words: mechanical properties, thickness of the sheets, microalloying.

Постановка проблемы. Высокий уровень прочности и хладостойкости конструкционных сталей достигается микролегированием сильными карбо- и нитридообразующими элементами. С этой целью используются ниобий, ванадий и титан, карбонитриды которых обуславливают дисперсионное упрочнение, а также измельчение аустенитного и действительного зерна стали. Одной из актуальных задач современной металлургии является определение оптимальных концентраций микролегирующих элементов, обеспечивающих требуемую конструктивную прочность листовых сталей в результате прокатки и последующей термической обработки.

Цель статьи. Выполнить исследования влияния толщины и состава листового проката на свойства нормализованных сталей S355NL, направленные на улучшение качественных показателей листового проката ответственного назначения.

Анализ последних исследований и публикаций. Наиболее эффективное действие карбонитридов на свойства стали достигается при таком содержании легирующих элементов и температуре аустенитизации, которые обеспечивают переход в раствор упрочняющей фазы в количестве, достаточном для последующего дисперсионного упрочнения, а нерастворенной остается такая ее часть, которая необходима для создания эффективных барьеров, тормозящих рост зерен при нагреве. Однако при большой концентрации малорастворимые примеси диффундируют к границам зерен, являющимся областями с меньшей плотностью, обогащают их,

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ начальник термического сектора прокатной лаборатории ИТЦ ТУ ОАО «МК «Азовсталь»

⁴ инженер термического сектора прокатной лаборатории ИТЦ ТУ ОАО «МК «Азовсталь»

вызывая охрупчивание. Как известно [1, 2], нитрид титана формируется при довольно высоких температурах, поэтому он практически не может быть растворен в аустените при нагреве под нормализацию. Карбонитрид ниобия в полной мере растворяется в аустените лишь при нагреве до 1250 °С, в то время, как карбид ванадия характеризуется высокой растворимостью в аустените при относительно низкой температуре. Исследованию влияния микролегирующих элементов на свойства конструкционных сталей посвящены работы [1-3].

Изложение основного материала. Сталь марки S355NL классифицируется Евроноормами EN 10025-3 как низколегированная качественная сталь и относится к свариваемым мелкозернистым нормализованным сталям. Химический состав стали, %: $C_{max}=0,18$; $Mn=0,9-1,65$; $Si_{max}=0,50$; $P_{max}=0,025$; $S_{max}=0,02$; $Nb_{max}=0,05$; $V_{max}=0,12$; $Al_{min}=0,02$; $Ti_{max}=0,05$; $Cr_{max}=0,3$; $Ni_{max}=0,05$; $Cu_{max}=0,5$; $Mo_{max}=0,1$; $C_{эжв. max}=0,45$. К данной стали предъявляются повышенные требования к пределу текучести (табл. 1) и предназначена она для работы при низких температурах.

Таблица 1

Требуемые механические свойства стали S355NL

Марка стали	Толщина, мм	$\sigma_{0,2min}$, МПа	σ_{Bmin} , МПа	δ_{min} , %	KV _{min} , Дж при испытании продольных образцов при температуре испытания, °С						KV _{min} , Дж при испытании поперечных образцов при температуре испытания, °С							
					+20	0	-10	-20	-30	-40	-50	+20	0	-10	-20	-30	-40	-50
S355NL	≤16	355	470÷630	22	+20	0	-10	-20	-30	-40	-50	+20	0	-10	-20	-30	-40	-50
	>16≤40	345			63	55	51	47	40	31	27	40	34	30	27	23	20	16
	>40≤63	335		21	63	55	51	47	40	31	27	40	34	30	27	23	20	16
	>63≤80	325			63	55	51	47	40	31	27	40	34	30	27	23	20	16
	>80≤100	315			63	55	51	47	40	31	27	40	34	30	27	23	20	16

В данной работе выполнен анализ зависимости механических свойств от толщины листов для S355NL, изучены особенности микроструктуры стали с различным содержанием ванадия. Для аналитического исследования и построения графиков (рис. 1-2) был выбран массив, состоящий из 4849 результатов испытаний прочностных свойств, 7731 испытаний работы удара при -20 °С, 6561 испытаний работы удара при -40 °С листового проката толщиной от 10 до 100 мм после нормализации. Массив разделен на 2 части, в первую вошли плавки, не содержащие ванадий, во вторую – плавки с 0,03÷0,06% ванадия.

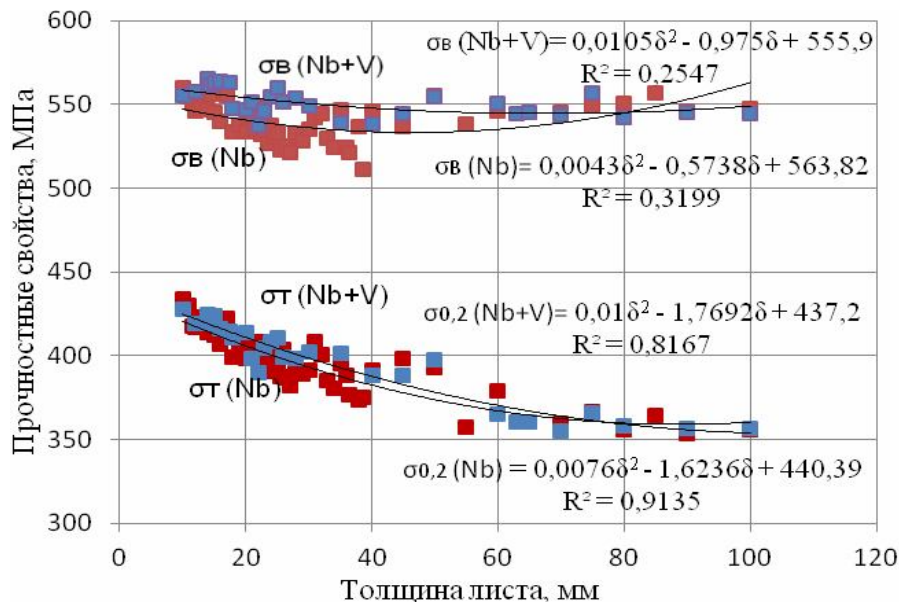


Рис. 1 – Сравнительный анализ прочностных характеристик стали марки S355NL толщиной 10÷100 мм с 0,03 ÷ 0,06% ванадия и без ванадия

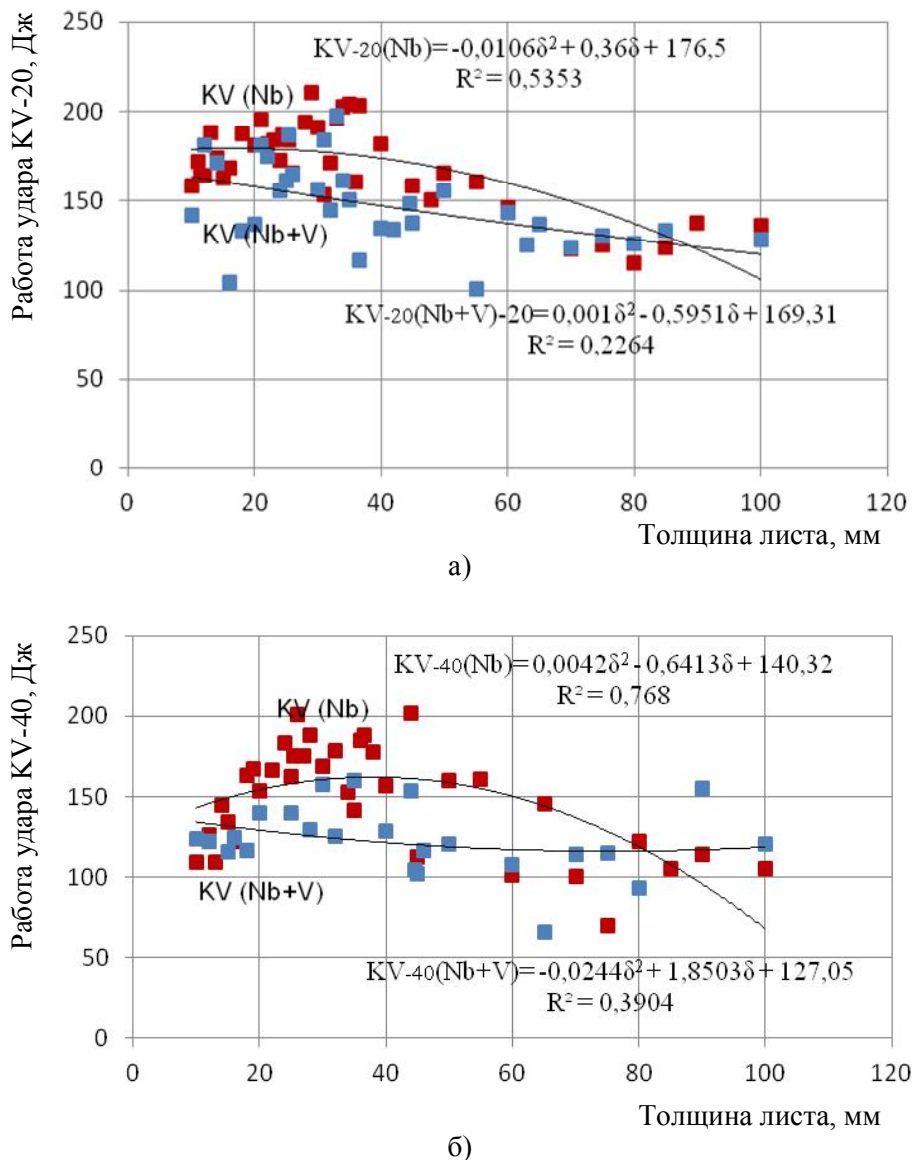


Рис. 2 – Сравнительный анализ работы удара образцов, отобранных вдоль направления прокатки стали марки S355NL толщиной 10÷100 мм с 0,03÷0,06% ванадия и без ванадия: а – работа удара при -20 °С, б – при -40 °С

Как видно из рисунков, введение ванадия в сталь с Nb приводит к повышению, главным образом, временного сопротивления разрыву; предел текучести при вводе ванадия увеличивается незначительно. Кроме того, на графиках представлены зависимости $\sigma_b = f(\delta)$ и $\sigma_{0,2} = f(\delta)$ для стали S355NL разных систем легирования. Для $\sigma_b = f(\delta, \text{мм})$ $R^2 \approx 0,3$, а для уравнения $\sigma_{0,2} = f(\delta, \text{мм})$ $R^2 \approx 0,8$. С увеличением толщины листов от 10 до 100 мм предел прочности σ_b практически не изменяется и находится в пределах доверительного интервала, а предел текучести $\sigma_{0,2}$ заметно снижается от 430 МПа при $\delta = 10$ мм до 360 МПа при $\delta = 100$ мм (примерно на 70 МПа). Такая тенденция изменения $\sigma_{0,2}$ характерна для стали S355NL только с Nb и с Nb + V.

Работа удара понижается с увеличением толщины листов как при испытании при -20 °С, так и при -40 °С. Для указанных температур испытания KV(Nb) всегда больше KV(Nb+V) на ~20÷30 Дж. Поэтому, если требуется проведение испытаний при отрицательных температурах, введение ванадия в данную сталь нецелесообразно. Опытные зависимости аппроксимируются уравнениями полиномиального вида с $R^2 = 0,5 \div 0,8$ для KV(Nb) и $R^2 = 0,2 \div 0,4$ для KV(Nb+V). Более высокие коэффициенты достоверности аппроксимации R^2 для KV стали S355NL с Nb свидетельствуют о более стабильных результатах испытаний по Шарпи и меньшем разбросе

значений работы удара относительно ее среднего значения, что также может служить косвенным подтверждением неблагоприятного влияния ванадия на работу удара этой стали S355NL, как для листов, так и для плит.

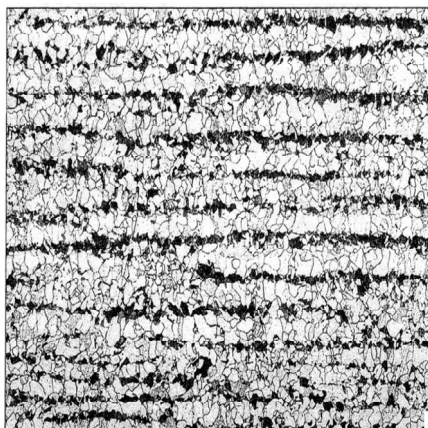
Для изучения микроструктуры и определения размера зерна отобраны пробы толщиной 40÷60 мм после нормализации листового проката стали S355NL. Режимы термической обработки и содержание ванадия в исследованных пробах представлены в таблице 2.

Таблица 2

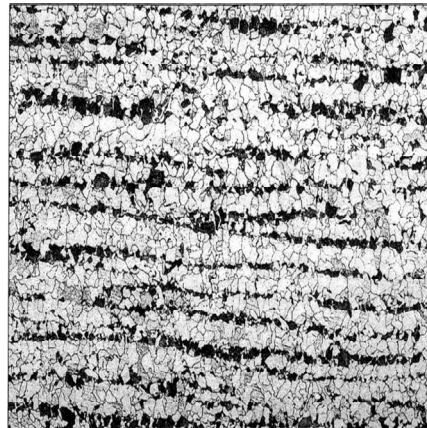
Режим термической обработки изучаемых сталей

Плавка S355NL	Содержание V, %	Толщина, мм	Режим нормализации	Печи, в которых производился нагрев
1	<0,005	40	920 °С; 1,5 мин/мм	Роликовые непрерывного действия
2	0,034	50	920 °С; 1,5 мин/мм	
3	0,054	55	890 °С; 1,6 мин/мм	Камерные печи с выкатным подом
4	<0,005	60	890 °С; 1,6 мин/мм	

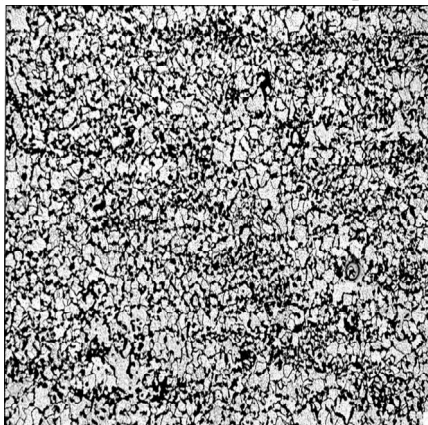
Результаты исследований микроструктуры и оценки размера зерна по ГОСТ 5639 представлены на рис. 3. Микроструктуру исследовали после травления шлифов в 4%-м спиртовом растворе HNO₃. Микроструктура всех образцов феррито-перлитная с увеличенным количеством перлитной составляющей в осевой зоне.



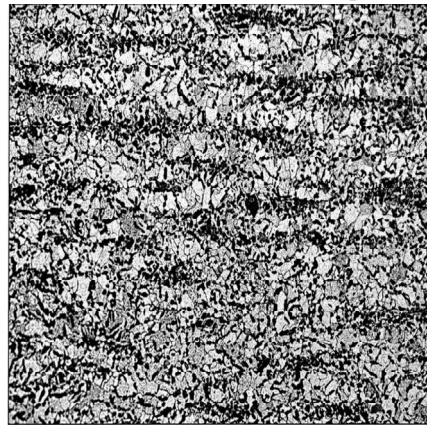
а) плавка 1 (без ванадия), № зерна – 11



б) плавка 2 (0,034% V), № зерна – 9



в) плавка 3 (0,054% V), № зерна – 9



г) плавка 4 (без ванадия), № зерна – 8

Рис. 3 – Микроструктура (×200) исследованных проб

Как видно из приведенных фотографий микроструктуры, а также по результатам оценки размера зерна, добавление ванадия в сталь заметного влияния на изменение структуры не оказывает.

Выводы

1. Регрессионный анализ влияния толщины листов на механические свойства конструкционной стали S355NL, микролегированной только ниобием и одновременно ниобием и ванадием показал, что добавление ванадия в сталь приводит к повышению σ_b и $\sigma_{0.2}$, работа удара при -20 и -40 °C при этом снижается. Для указанных температур испытания KV(Nb) больше KV(Nb+V) на ~20-30 Дж. С увеличением толщины листов от 20 до 120 мм все характеристики механических свойств имеют тенденцию к снижению.
2. Исследована микроструктура листовой стали S355NL с различным содержанием ванадия на поверхности, на $\frac{1}{4}$ от поверхности и в центре листа после нормализации от 890 и 920 °C. Установлено, что на поверхности микроструктура представляет собой зерна феррита №8-10 и перлита. На $\frac{1}{4}$ от поверхности и в центре листа ферритное зерно несколько крупнее, №8, с явно выраженной полосчатостью. Колебания содержания ванадия не оказывают заметного влияния на структуру листовой стали.
3. Результаты выполненного анализа дают основания считать, что при условии сохранения содержания всех элементов, за исключением V, на уровне Евронорм, введение ванадия является нецелесообразным.

Список использованных источников:

1. Liu Yong , Zhang Zhongping. Vanadium's Impact on Metallographic Transitions of HSLA Steel // International Seminar 2005 on Application Technologies of Vanadium in Flat – Rolled Steels. – 2005. – P. 105-109.
2. Rassizadehghani J. Mechanical Properties of V-, Nb-, and Ti-bearing As-cast Microalloyed Steels / J. Rassizadehghani, H. Najafiy, M. Emamy, G. Eslami-Saeen // J. Mater. Sci. Technol. – 2009. – № 6. – P. 779-784.
3. DeArdo J. Niobium in Modern Steels // International Materials Reviews. – 2003. – № 6. – P. 371.

Bibliography:

1. Liu Yong , Zhang Zhongping. Vanadium's Impact on Metallographic Transitions of HSLA Steel // International Seminar 2005 on Application Technologies of Vanadium in Flat – Rolled Steels. – 2005. – P. 105-109.
2. Rassizadehghani J. Mechanical Properties of V-, Nb-, and Ti-bearing As-cast Microalloyed Steels / J. Rassizadehghani, H. Najafiy, M. Emamy, G. Eslami-Saeen // J. Mater. Sci. Technol. – 2009. – № 6. – P. 779-784.
3. DeArdo J. Niobium in Modern Steels // International Materials Reviews. – 2003. – № 6. – P. 371.

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

Статья поступила 15.02.2012