

УДК 621.78:669.018.29

Рябікіна М. А.¹, Ткаченко Ф. К.², Ставровская В. Е.³, Галковская Е. А.⁴

ВЛИЯНИЕ ОТПУСКА НА СВОЙСТВА КОТЕЛЬНОЙ СТАЛИ P460NL1

В статье выполнен анализ механических свойств котельной стали P460NL с различным содержанием ванадия. Для получения требуемого уровня значений работы удара в плавках с содержанием $V=0,1-0,2\%$ предложен отпуск после нормализации.

Ключевые слова: *сосуды высокого давления, работа удара, отпуск, карбиды ванадия.*

Рябікіна М.А., Ткаченко Ф.К., Ставровська В.Є., Галковська К.А. Вплив відпуску на властивості котельної сталі P460NL. У статті виконаний аналіз механічних властивостей котельної сталі P460NL з різним вмістом ванадію. Для здобуття необхідного рівня значень роботи удару в плавках із вмістом $V=0,1-0,2\%$ запропонований відпуск після нормалізації.

Ключові слова: *судини високого тиску, робота удару, відпустка, карбід ванадію.*

Ryabikina M.A., Tkachenko F.K., Stavrovskaya V.E., Galkovskaya E.A. Effect of tempering on the properties of boiler steel P460NL. In the article analysis of mechanical properties of boiler steel P460NL with different vanadium content was performed. To obtain the required values of impact energy in steel, tempering after normalizing was suggested.

Keywords: *pressure vessel, impact energy, tempering, vanadium carbide.*

Постановка проблемы. Исследования в данной статье выполнены на котельной стали P460L1 с ванадием. Ванадий, как известно [1], эффективно упрочняет феррит частицами VN и V(CN), но при этом отрицательно влияет на пластичность и вязкость стали. Снижение вязкости частично компенсируется введением Ni и измельчением зерна. В отдельных плавках нормализованной стали с содержанием ванадия на верхнем пределе не достигается требуемый стандартом EN 10028 уровень работы удара при отрицательных температурах испытания.

Анализ последних исследований и публикаций. Теоретические и прикладные проблемы обеспечения высокой прочности, пластичности и вязкости ВПНЛ сталей исследованы во многих работах известных отечественных и зарубежных ученых. Весомый вклад в решение этого вопроса внесли: Матросов Ю.И., Одесский П.Д., Эфрон Л. И., Ф.Б. Пиккеринг, Т. Сакума и др.

Для достижения требуемых свойств ВПНЛ сталей используют сложные системы микролегирующих добавок при четко выраженной тенденции снижения концентрации углерода в металле. Содержание Ti, Nb и V должно быть точно увязано с содержанием С и N. Важным аспектом является обеспечение металлургической чистоты сталей. Применяют современные упрочняющие технологии производства - контролируруемую прокатку с последующим ускоренным охлаждением.

Цель статьи – разработка режима термической обработки, обеспечивающего повышение уровня работы удара котельной стали P460NL1.

Изложение основного материала. В работе исследована листовая сталь P460NL1 для сосудов высокого давления, которая производится в условиях ОАО «МК «Азовсталь». Требуемый химический состав, %: $C_{\max}=0,2$; $Mn=1,0-1,70$; $Si_{\max}=0,60$; $P_{\max}=0,025$; $S_{\max}=0,015$; $Al_{p-pmin}=0,02$; $Cr_{\max}=0,30$; $Mo_{\max}=0,10$; $Cu=0,3-0,7$; $Ni_{\max}=0,8$; $Nb=0,02-0,05$; $Ti_{\max}=0,03$; $V_{\max}=0,2$; $(Nb+Ti+V)=0,22$. Требования стандарта DIN EN 10028 к механическим свойствам листов

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

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

³ инженер термического сектора прокатной лаборатории ИТЦ ОАО «МК «Азовсталь»

⁴ студентка, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

толщиной ≤ 60 мм: $\sigma_{0,2} \geq 460$ МПа, $\sigma_B = 570-720$ МПа, $\delta_5 \geq 17$ %, $KV_{20} \geq 35$ Дж, $KV_{40} \geq 27$ Дж. Термическая обработка проката – нормализация от 910 °С, которая выполняется в проходных роликовых печах стана 3600. Статистика механических свойств листовой стали P460NL1 толщиной менее 60 мм в поперечном направлении приведена в таблице 1. Объем выборки составил 605 плавок.

Таблица 1

Статистика механических свойств

	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	KV_{20} , Дж
Диапазон значений	420-600	580-760	11-33	20-198
Среднее значение	485	670	22	109

Установлено, что увеличение содержания V в пределах плавочного состава приводит к увеличению прочности на $\sim 20-30$ МПа, при этом в отдельных плавках стали P460NL1 содержанием V на верхнем пределе значения работы удара получают неудовлетворительными. После нормализации структура стали - феррит + перлит, в отдельных случаях с участками бейнитной составляющей. Номер зерен феррита по шкале ASTM - 9-10.

Лабораторные исследования выполнены на карточках толщиной 29 мм. Химический состав стали приведен в таблице 2. Сталь P460NL1 подвергалась термической обработке: нормализации от 900 °С, $\tau_{vd} = 1,5$ мин/мм и нормализации + отпуск при температурах 600, 650 и 700 °С, $\tau_{vd} = 3,5$ мин/мм. Образцы для испытания на растяжение и ударные испытания по Шарпи с V –образным надрезом были взяты в поперечном направлении.

Таблица 2

Химический состав (%) исследованной стали

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Mo	Nb	V	N	$C_{экв.}$
0,17	1,58	0,23	0,003	0,013	0,03	0,67	0,02	0,034	< 0,005	< 0,01	0,045	0,13	0,005	0,50

На рисунке 1 представлены свойства стали P460NL1 толщиной 29 мм после нормализации и отпуска. Как видно, после нормализации $\sigma_{0,2} = 510$ МПа и $\sigma_B = 690$ МПа. Отпуск при 600 °С вызывает снижение σ_B до 663 МПа, при этом $\sigma_{0,2}$ незначительно возрастает до 518 МПа. После нормализации и отпуска при 650 °С $\sigma_{0,2} = 523$ МПа и $\sigma_B = 640$ МПа. С увеличением температуры отпуска в интервале $600-700$ °С $\sigma_{0,2}$ изменяется незначительно, а σ_B более существенно (падение на ~ 30 МПа) и составляют $\sigma_{0,2} = 507$ МПа и $\sigma_B = 634$ МПа при 700 °С. Предел прочности σ_B характеризует степень упрочнения металла при пластической деформации. По мере повышения температуры отпуска интенсивность упрочнения ослабевает, что обусловлено уменьшением дисперсности структуры при повышении температуры отпуска.

Испытания показали, что после нормализации $\delta = 21$ %, в результате отпуска при $600-700$ °С δ повышается до 26 %.

Работа удара нормализованной стали P460NL1 при температуре испытания -20 °С составила 30 Дж. В результате отпуска при температуре 600 °С KV_{20} повысилась на ~ 35 Дж и составила 67 Дж. Отпуск при 650 и 700 °С вызывает дальнейшее повышение работы удара. Например, для листов толщиной 29 мм после отпуска на максимальную температуру $KV_{20} \approx 140$ Дж.

Во время отпуска происходят процессы сфероидизации карбонитридных частиц в феррите, возврат и рекристаллизация ферритной матрицы. С увеличением температуры отпуска ванадий, обладающий большим сродством к углероду, может замещать железо в карбиде Fe_3C , при этом возможное снижение количества карбидов составит приблизительно ~ 3 раза. Все эти процессы положительно влияют на величину работы удара. В работе [1] установлено, что в стали P460NL1 после нормализации и отпуска размер частиц V(CN) и Nb (CN) составляет 10-40 нм, они имеют округлую форму и равномерно распределяются в ферритной матрице, в то время, как после нормализации или ускоренного охлаждения форма частиц V(CN) пластинчатая [2,3].

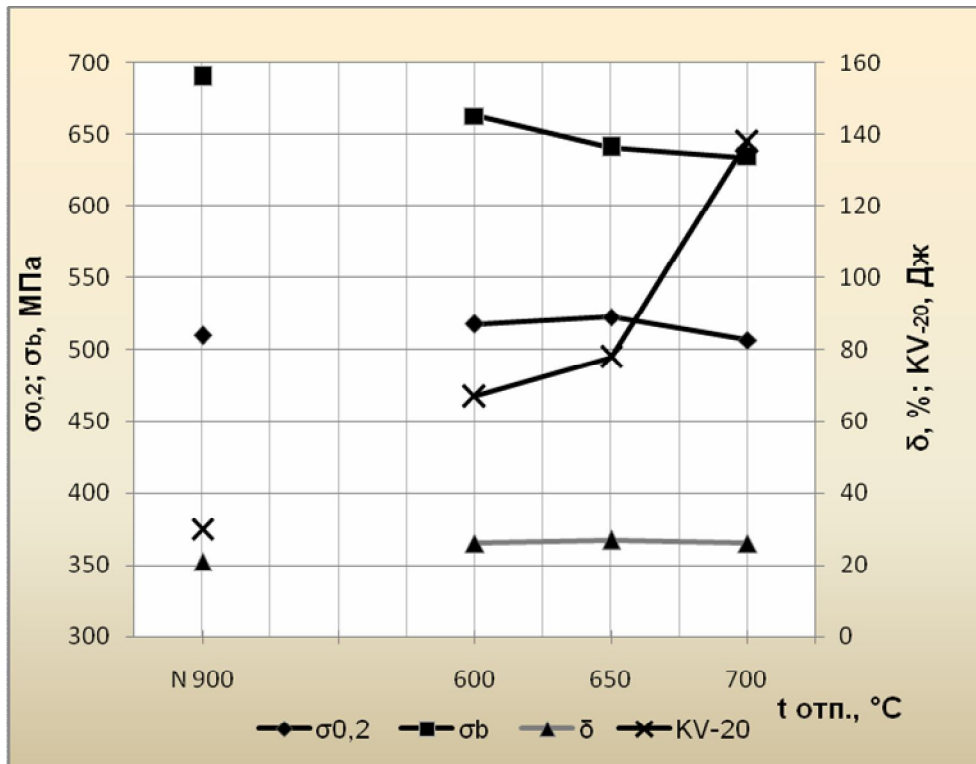


Рисунок – Влияние температуры отпуска на свойства нормализованной стали P460NL1

Подобные исследования выполнены также на карточках из стали P460NL1 с V=0,064 % толщиной 45 и 32 мм, в результате которых были получены аналогичные зависимости. После нормализации и отпуска при 600 °C работа удара листов толщиной 45 мм составила KV₂₀=180, KV₄₀=140 и KV₅₀=120 Дж.

Промышленные испытания показали, что в стали P460NL1 с V (0,10-0,13%) после нормализации от 900 °C и последующего отпуска при 600-650 °C значения KV₂₀ составляют 70-140 Дж. По сравнению с нормализованным состоянием работа удара в стали P460NL1 с V ≥ 0,1 % возрастает в ~2 раза.

Выводы

1. Установлено, что в стали P460NL1 с содержанием V в количестве 0,10-0,13%, после нормализации от 900 °C уровень работы удара при отрицательных температурах испытания не соответствуют требованиям DIN EN 10028.
2. Результаты проведенных исследований показали, что нормализация от 900 °C с последующим отпуском при 600 - 650 °C позволяет получить значения работы удара KV₂₀ в пределах 70-140 Дж с сохранением прочности на уровне σ_{0,2} ≥ 460 МПа.

Список использованных источников:

1. Zhang Yongjia. Research and Production of V-Cu-Ni Series High-strength Steel for Pressure Vessel // Bao Steel Research Institute, Shanghai. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.vanitec.org>.
2. Liu Yong, Zhang Zhongping, She Guangfu. Analysis on Vanadium Impact on Metallographic Transitions of HSLA Steel // International Seminar 2005 on Application Technologies of Vanadium in Flat – Rolled Steels.
3. Yang Caifu, Zhang Vongquan. Applications on V-N Microalloying technology in HSLA Steels // Iron and Steel. - 2002. - 37 (11) – P. 42-47

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

Статья поступила 14.04.2010