

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС**

УДК 621.791.73.07

**О СВАРИВАЕМОСТИ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ РАЗНОЙ
ВЫПЛАВКИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**

© 2014 г. Н.Н. Подрезов*, Ю.В. Доронин**, Л.С. Хегай*

* *Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл.*

** *ООО «Аттестационный центр городского хозяйства», Москва*

В статье даны результаты исследования свариваемости корпусных сталей бейнитного класса 15X2НМФА и 10ГН2МФА, прошедших дополнительную обработку на УВРВ. Сделан вывод о влиянии способа выплавки основного металла на пластичность исследованных сталей в интервале температур существования аустенита.

Ключевые слова: свариваемость, теплоустойчивые корпусные стали, УВРВ (установка внепечного рафинирования и вакуумирования), аустенитный интервал, высокотемпературная пластичность.

Поступила в редакцию 24.07.2014 г.

Начиная с 1973 г. и по настоящее время в производстве сосудов давления АЭУ основными конструкционными материалами являются теплоустойчивые легированные стали бейнитного класса 15X2НМФА и 10ГН2МФА. Установлено, что на свариваемость этих сталей оказывает сильное влияние технология выплавки основного металла.

Не смотря на низкое содержание углерода, данные материалы изначально относились к ограниченно свариваемым по результатам аттестационных испытаний [1]. В начальный период времени эффективные меры и приёмы для повышения их свариваемости были отработаны в НПО ЦНИИТМАШ и внедрены на заготовках основного металла, выплавляемого по традиционным технологиям в мартеновских, электродуговых печах.

Однако при промышленном изготовлении оборудования АЭУ на отраслевых предприятиях в 1975-1980 г.г. практически сразу была установлена следующая особенность получения основного металла мартеновским и электродуговым способом. Приходилось часто применять дорогостоящую дополнительную термообработку для обеспечения сдаточного комплекса механических свойств изделий на разных стадиях их изготовления, что касалось и сварных соединений.

По этой причине, а также для обеспечения конструкционной хрупкой прочности в ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» были выполнены успешные работы по переводу сталей 15X2НМФА и 10ГН2МФА на передовые технологии выплавки [2]. В 80-х годах на Ижорских заводах для корпусных сталей начали применять выплавку в основных мартеновских и электродуговых печах с последующей обработкой металла на установке внепечного рафинирования и вакуумирования (УВРВ) производства шведской фирмы ASEA [3]. Из-за достигнутого заметного улучшения механических характеристик, практически вся корпусная сталь к 1995 г. поставлялась только после дополнительной обработки на УВРВ.

Возникает вопрос, какое влияние оказывает введение обязательной дополнительной обработки на УВРВ на свариваемость корпусных сталей.

Изучалась высокотемпературная пластичность сталей 15Х2НМФА и 10ГН2МФА, таблице 1, в аустенитном интервале температур.

Таблица 1. – Химический состав исследованных промышленных сталей

N п/п	Химический состав, % вес									Способ выплавки
	C	Si	Cr	Ni	Mn	Mo	V	S	P	
10ГН2МФА										
1	0,10	0,26	0,19	2,24	0,85	0,46	0,03	0,015	0,010	УВРВ
2	0,10	0,26	0,26	2,25	0,95	0,47	0,04	0,013	0,009	ЭШП
3	0,11	0,27	0,13	2,05	0,90	0,54	0,02	0,016	0,012	ВДП
15Х2НМФА										
4	0,16	0,20	2,07	1,38	0,38	0,56	0,12	0,016	0,008	УВРВ
5	0,16	0,24	2,05	1,16	0,47	0,52	0,11	0,014	0,007	ОМП

Обозначения: ВДП – вакуумно-дуговая плавка, ОМП – основная мартеновская плавка, УВРВ – ОМП + обработка на установке внепечного рафинирования и вакуумирования.

Образцы (рис. 1) перегревали в область аустенита вплоть до солидуса, далее подстуживали и механически испытывали выше и около A_{C3} на установке ИМАШ-20-75 («Ала-Тоо»).

Радиационный нагрев осуществлялся молибденовыми нагревателями шириной 35 мм толщиной 0,25 мм в камере, где создавался вакуум порядка $10^{-4} \dots 10^{-5}$ атм. Среднюю часть образца размечали через семь мм на длине 20 мм и приваривали три термопары типа W – (W-Re) толщиной 0,3 мм. Нагрев и подстуживание образца проводился по термопаре, показывающей максимальную температуру. На среднем участке образца длиной 20 мм достигалась сравнительно равномерная температура прогрева, расчётная длина L_0 прогретого на заданную температуру участка принималась равной 10 мм.

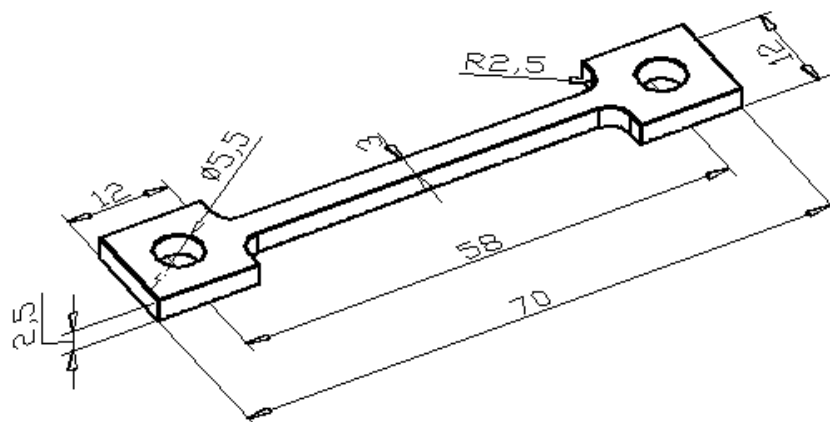


Рис. 1. – Образец для испытаний на установке ИМАШ – 20 – 78 «Ала-Тоо»

Незашемлённый в захватах машины образец нагревали до заданной температуры подстуживали до температур испытаний, изотермически выдерживали, растягивали.

Испытания проводили при скоростях растяжения 2; 0,16, 0,01 мм/мин, что соответствовало скоростям деформации в 10-ти миллиметровом участке образца $\sim 3 \cdot 10^3$; $\sim 3 \cdot 10^4$; $\sim 1,5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$.

Результаты испытаний представлены на рисунке 2. Сталь 10ГН2МФА на ветви охлаждения после подстуживания от 1150 °С на разные температуры имеет минимум пластических свойств между 800...900 °С. Относительное сужение уменьшается от 95 до 40%, а относительное удлинение – от 115 до 55%. После выхода из минимума пластичности значения указанных характеристик возрастают до 80...85% и 75% соответственно.

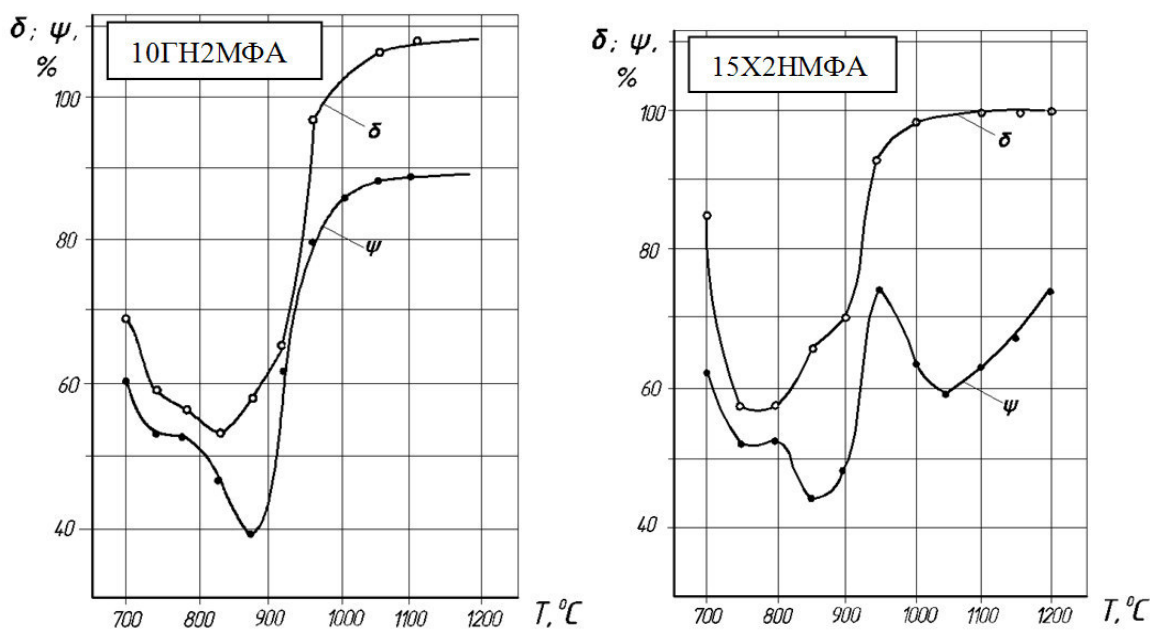


Рис. 2. – Пластичность корпусных сталей (табл. 1: №1, №4) после подстуживания от 1150 °С до $T_{исп}$, $V_p = 2$ мм/мин; δ – относительное удлинение; ψ – относительное сужение

Аналогичный провал пластичности установлен у стали 15X2НМФА. Важно отметить, что в ходе многочисленных экспериментов по средне-температурному интервалу хрупкости постоянно выявлялось большое сходство в результатах испытаний для обеих корпусных сталей. Как следует из анализа марочных полос по химическому составу [4] корпусные стали примерно одинаково сбалансированы по феррито- и аустенитообразующим легирующим элементам с учётом разницы по содержанию углерода.

Изучение влияния способа выплавки проводили на всех приведённых в таблице 1 сталях. Результаты испытаний образцов из промышленных плавок стали 15X2НМФА приведены в таблице 2. Образцы последовательно перегревались в аустенитную область на температуры 1150, 1200, 1250, 1300, 1350 °С, гомогенизировались, подстуживались до $T_{исп} = 850$ °С и после небольшой выдержки растягивались до разрушения. Скорость растяжения составляла 0,1...0,2 мм/мин, что соответствовало скорости деформации $\sim 3 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ в равномерно нагреваемой зоне образца.

По результатам испытаний впервые было установлено влияние технологии выплавки стали 15X2НМФА на 850-градусную хрупкость. При $T_{II} = 1350$ °С наблюдали падение значений ψ до 15% ещё при сравнительно высокой скорости растяжения $V_p = 0,1...0,2$ мм/мин. При этом для «смягчения» имитационного термоцикла на ветви охлаждения под ТЦС электрошлаковой сварки металл до начала охлаждения выдерживался при T_{II} в течение 2 мин.

Таблица 2. – Влияние T_{II} на Ψ стали 15X2НМФА разной выплавки при подстуживании до $T_{исп.} = 850^{\circ}\text{C}$, $V_p = 0,1 \dots 0,2$ мм/мин

№№ по табл.1	Температура перегрева T_{II} , $^{\circ}\text{C}$				
	1150	1200	1250	1300	1350
	Ψ , % при $T_{исп.} = 850^{\circ}\text{C}$				
УВРВ, №4	67	53	46	42	15
ОМП, №5	97	71	56	55	45

В целом из анализа данных таблицы 2 следует, что в аустенитной области перегретый мартеновский металл охрупчивается значительно меньше. Так, для мартеновской стали отношения $\psi_{1150} / \psi_{1250} = 1,76$, $\psi_{1300} / \psi_{1350} = 1,08$, для вакуумированной - $\psi_{1150} / \psi_{1250} = 1,46$, $\psi_{1300} / \psi_{1350} = 2,80$.

Можно предполагать усиление охрупчивания по мере дальнейшего уменьшения V_p вплоть до значений, соответствующих ползучести, т.е. при испытаниях образцов в условиях, приближенных к реальным процессам деформирования металла в сварном соединении. Эта тенденция прослеживается при испытаниях перегретой на 1350°C стали 10ГН2МФА (пл. №№1-3, табл.1) при $V_p = 0,01$ мм/мин (рис.3). Для электродугового металла ψ составило 20% (кривая 2), электрошлакового переплава (кривая 1) ~ в два с половиной раза меньше, УВРВ (кривая 3) – 10%.

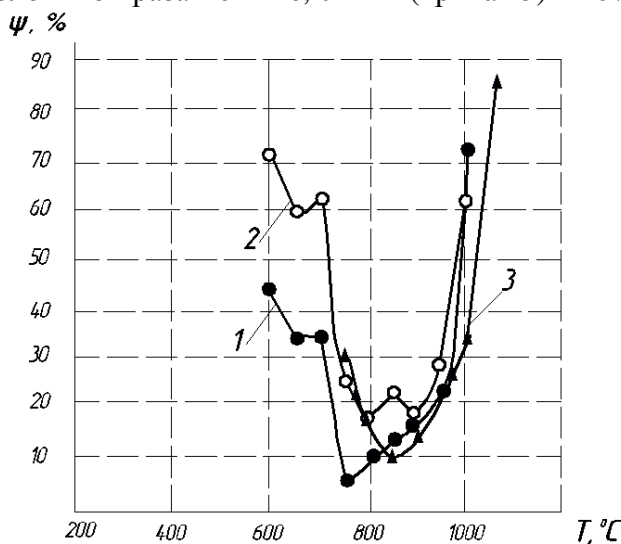


Рис. 3. – Пластичность стали 10ГН2МФА различной выплавки в аустенитной области после перегрева на 1350°C . $V_p = 0,01$ мм/мин; 1 – ЭШП; 2 – ВДП; 3 – УВРВ

Ранее интервал пониженной пластичности аустенита при $700-850^{\circ}\text{C}$ был обнаружен Х. Сузуки с соавторами [5] применительно к процессам непрерывной разливки слабовых заготовок из обычных углеродистых хорошо раскисленных и рафинированных сталей.

В настоящей работе исследовались корпусные легированные стали, применяемые для сварки изделий АЭУ. Для температурного интервала $800 \dots 900^{\circ}\text{C}$ получен аналогичный результат: впервые установлен минимум пластичности, кроме того установлена его зависимость по критерию ψ от технологии выплавки основного металла при снижении скорости деформации растяжения до значений, возникающих при термомеханических циклах сварки. Например, скорость деформации металла шва и ОШЗ электрошлаковых сварных соединений находится в пределах $\sim 10^{-4} \dots 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ [1].

ВЫВОДЫ

1) Легированные корпусные стали 10ГН2МФА и 15Х2НМФА с дополнительной обработкой в УВРВ имеют минимум пластичности в аустенитной области в диапазоне температур 800...900 °С.

2) Пластичность в обнаруженном снижении по критерию ψ зависит от:

– технологии выплавки основного металла. Чем более дегазированная и рафинированная сталь применяется, тем ниже её пластичность при 800...900 °С;

– температуры перегрева. Чем выше перегрев в аустенитной области, тем ниже пластичность;

– скорости деформации. Максимальное охрупчивание наблюдалось при $\sim 10^{-4} \dots 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

3) При исчерпании деформационной способности сварных соединений из сталей 10ГН2МФА и 15Х2НМФА в диапазоне 800...900 °С на ветви охлаждения ТЦС возможна потеря технологической прочности с образованием «тёплых» трещин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка, исследование и комплексная оценка свойств технологичных сталей перлитного класса, соответствующих требованиям международных стандартов, и разработка технологии производства с оформлением для применения в реакторостроении (отчёт по комплексной теме А-62) [Текст] / рук. Зорев Н.Н., Астафьев А.А., Тимофеев М.М., Дуб В.С. – М.: НПО ЦНИИТМаш, 1973. - С. 358.
2. Дуб, А.В. Развитие основных конструкционных материалов для изготовления реакторов ВВЭР [Электронный ресурс] / А.В Дуб // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: материалы VIII междунар. научно-технической конф., Подольск, 28-31 мая 2013 г. / ОКБ «Гидропресс». - Режим доступа: URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2013/autorun/index-ru.htm>. – 15.07.2014.
3. Горынин, И.В. и др. Вероятностный анализ механических свойств материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 [Текст] / И.В. Горынин, Б.Т. Тимофеев, А.А. Сорокин // Проблемы прочности. – 2006. – №2. – С. 15–28.
4. Марочник сталей и сплавов [Текст] / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – С. 784.
5. Сузуки, Х. и др. Зависимость между хрупкостью стали при высокой температуре и растрескивании непрерывнолитых заготовок [Текст] / Х. Сузуки // Тэцу то хаганэ.– 1981. – 67. – №4. – С. 171.

About Weldability of Heat-Resistant Steels of Different Smelting Used in the Nuclear Power Industry

N.N. Podrezov*, Y.V. Doronin**, L.S. Hegaj*

* *Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», 73/94 Lenin St., Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360, e-mail: p1n2f@rambler.ru ;*

** *LTD «Certification Center of municipal services», 47A Izmajlovskoe St.(schosse), Moscow, Russia 105187, e-mail: beckenbauer@yandex.ru*

Abstract – The paper presents results of investigation of weldability of the reactor and steam steel bainite class 15X2НМФА and 10ГН2МФА held for more processing in installation of secondary refining and vacuum. The conclusion about influence of metallurgical background base metal on plastic deformation is investigated in austenitic steels temperature range.

Keywords: welding, heat-resistant steel hull, installation of secondary refining and vacuum, austenitic interval, high-temperature ductility.

REFERENCES

- [1] Zorev N.N., Astafev A.A., Timofeev M.M., Dub V.S. Razrabotka, issledovanie i kompleksnaja ocenka svojstv tehnologichnyh stalej perlitnogo klassa, sootvetstvujushhih trebovanijam mezhdunarodnyh standartov, i razrabotka tehnologii proizvodstva s oformleniem dlja primenenija v reaktorostroenii (otchjot po kompleksnoj teme A-62) [Development, research and complex assessment of properties technological staly perlitny class, the international standards conforming to requirements, and development of technology productions with registration for application in reactor building (the report on a complex subject A-62)]. NPO CNIITMash [head Zorev N. N., Astafyev A.A., Timofeev M. M., V.S. Dub]. M. Pub. PJSC SPA "CNIITMASH" [Central Research Institute of Machine Building Technology], 1973. p. 358. (in Russian)
- [2] Dub A.V. Razvitie osnovnyh konstrukcionnyh materialov dlja izgotovlenija reaktorov VVJeR [Development of the main constructional materials for WWER reactor production]. Obespechenie bezopasnosti AJeS s VVJeR: materialy VIII mezhdunar. nauchno-tehnicheskoy konf., Podolsk, 28-31 maja 2013 g [Safety of the NPP with WWER: materials VIII international scientific and technical conference, Podolsk, May 28-31, 2013] OKB «Gidropress» [Experimental design bureau "Hydropress"]. 2013. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2013/autorun/indexru.htm> (in Russian)
- [3] Gorynin I.V., Timofeev B.T., Sorokin A.A. Veroyatnostnyj analiz mehanicheskikh svojstv materialov korpusov reaktorov VVJeR-1000 [Probabilistic analysis of mechanical properties of WWER-1000 reactor materials]. Problemy prochnosti [Durability problems]. 2006, №2, ISSN 0556-171X, pp. 15–28 (in Russian)
- [4] Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirskij Ju.V. etc. Marochnik stalej i splavov [Marochnik staly and alloys] / Pod obshhej red. A.S. Zubchenko [Edited by A.S. Zubchenko.]. M. Pub. Mashinostroenie [Mechanical engineering], 2003, ISBN 5-217-03177-8, 784 p. (in Russian)
- [5] Suzuki H. etc. Zavisimost mezhdu hrupkostju stali pri vysokoj temperature i rastreskivanii nepreryvnolityh zagotovok [Dependence between fragility became at high temperature and cracking the continuous cast blanks]. Tjecu to haganje, 1981, Vol. 67, №4, ISSN 0021-1575, p. 171. (in English)