

УДК 669.15.786-194

Н.С. Тумакова¹, В.П. Тихонов¹, А.С. Смирнов¹, С.Г. Самохвалов,¹ А.А. Большаков²,
В.Г. Назаров³, И.О. Леушин⁴

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИТЕЙНЫХ СВОЙСТВ СУПЕРДУПЛЕКСНОЙ И СЕРИЙНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ, РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПЫТНЫХ ОТЛИВОК КОРПУСОВ АРМАТУРЫ

ОАО Нижегородский научно-исследовательский институт машиностроительных материалов «Прометей»¹,

ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова»²,
ООО Научно-производственный центр «Эпсилон»³,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева⁴

Приводятся результаты сравнительных исследований жидкотекучести, стойкости против образования трещин, литейной усадки перспективной супердуплексной стали аустенитно-ферритного класса и серийной аустенитной стали 12X18H12M3TЛ применительно к изготовлению судовой арматуры в условиях отечественного литейного производства взамен приобретаемой по импорту.

Показано, что супер - дуплексная сталь по сравнению с аустенитной сталью имеет несколько большие значения температур ликвидус, солидус и усадки, меньшую жидкотекучесть и существенно меньшую склонность к образованию горячих трещин. Даны технологические рекомендации, изготовлены опытные литые заготовки корпусов судовой арматуры и выполнена оценка их качества. Таким образом, подтверждена возможность организации производства арматуры с применением перспективной стали взамен дорогостоящей арматуры, приобретаемой за границей.

Ключевые слова: супердуплексная сталь, литейные свойства, судовая арматура, коррозионная стойкость, прочность

Введение

Постоянно возрастающие параметры эксплуатации кораблей, морских сооружений, установок ТЭК (силовые нагрузки и агрессивность рабочей среды) предъявляют высокие требования к материалам для изготовления корпусной и регулирующей арматуры [1]. Отечественная судовая и энергетическая арматура с корпусами из бронзы, латуни и титановых сплавов и арматура, приобретаемая в настоящее время по импорту, с корпусами из аустенитной стали 316Ti (стандарт США AISI) отличаются высокой стоимостью, а применение для изготовления корпусов арматуры более дешевой стали типа 08X18H9TЛ (ГОСТ 977) не обеспечивает необходимую стойкость к локальным видам коррозии [2].

Поэтому создание отечественного производства судовой и энергетической арматуры с корпусами и другими деталями из перспективных материалов взамен, арматуры, приобретаемой по импорту, является чрезвычайно актуальной научно-технической задачей.

ОАО ННИИММ «Прометей» ранее были сформулированы [3] следующие основные технические требования к материалам корпусов судовой арматуры: материал должен быть технологичным, экономнолегированным, стойким против коррозии в морской воде и других рабочих средах, иметь комплекс высоких прочностных и пластических свойств.

На основании этих требований была выбрана для исследований высокопрочная азотистая хромоникельмолибденовая супердуплексная сталь аустенито-ферритного класса (далее супердуплексная), повышенной коррозионной стойкости, близкая по составу к сталям 1.4501, S 32760 (ASTM) [4]. Ранее проведенные лабораторные испытания показали, что такая сталь по физико-механическим и коррозионным свойствам отвечает предъявляемым требованиям, благодаря введению азота, а также дуплексной структуре металла (50% аустенита + 50% феррита). Информация о литейных свойствах стали в литературе крайне ограничена.

Из серийных сталей по композиции легирования наиболее близка к выбранной стали широко освоенная промышленностью сталь марки 12Х18Н12М3ТЛ, уступающая новой стали по прочности, коррозионной стойкости и стоимости.

Цель настоящей работы: на основании исследований литейных свойств выбранных материалов выбрать параметры технологии по критериям жидкотекучести, трещиностойкости и усадки металла и разработать технологию изготовления опытных литых заготовок корпусов судовой арматуры.

Методика проведения исследований

Исследования литейных свойств стали включали определение критических температур стали, ее жидкотекучести, трещиностойкости, линейной усадки и относительного объема усадочной раковины.

Выплавку стали для экспериментов проводили в условиях литейного производства ННИИММ «Прометей» на свежих материалах в индукционной печи ИСТ-0,25 повышенной частоты с основной футеровкой. Химический состав металла плавов для исследования литейных свойств соответствовал заданному.

Критические температуры определяли как расчетным путем, так и путем термометрирования затвердевания металла в формах из ХТС.

Расчет проводили по методике [5], основанной на влиянии легирующих элементов на снижение температуры ликвидус (T_L) сплава Fe–C. Согласно методике, при наличии нескольких химических элементов T_L будет снижаться на суммарную величину действия каждого из них. Таким образом, расчетная температура ликвидус определится по формуле

$$T_L = 1539 - \sum(\Delta T_{Li} \cdot [X_i]),$$

где T_L – температура ликвидус сплава; ΔT_{Li} – температура, на которую снижается температура ликвидус при введении в сплав 1% i -го легирующего элемента; $[X_i]$ – концентрация i -го легирующего элемента, выраженная в %.

Исходные данные для расчета представлены в табл. 4.

Таблица 1

Коэффициенты влияния содержания легирующих элементов на снижение температуры ликвидуса системы Fe-C

	Массовая доля элементов, %											
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P	N	V	Cu	Ti
ΔT_{Li}	70	3	12	1,5	3,5	3	30	30	90	2	4,7	18

Температура начала затвердевания железа принята равной 1539°C. При этом принимали, что все остальные критические точки диаграммы Fe–C, в том числе солидус, смещаются вниз по вертикали на такое же количество градусов, что и температура ликвидус, не меняя своего положения по горизонтали.

При определении критических температур сталей путем термометрирования затвердевания металла измерение температуры производили с помощью вольфрам-рениевых термопар. Термопару в расплав погружали сверху и удерживали с помощью штатива. Регистрацию показаний осуществляли с помощью электронного прибора МЕТАКОН.

Определение жидкотекучести сплава производили с помощью спиральных проб по ГОСТ 16438. Проба представляет собой спиральный трапециевидный канал площадью сечения 0,56 см² (основания 8 и 5 мм, высота 8 мм), длиной 1500 мм, стояк, выпор и заливную чашу со стопором. Использование стопора обеспечивало заливку определенной порции расплава во всех пробах. Заливку проб производили из ковша в стержни из ХТС. Длина залитой спирали являлась показателем жидкотекучести при данной температуре.

Определение склонности сталей к трещинообразованию выполняли с помощью тех-

нологических проб «решетка». Проба (рис 1) представляет собой сочетание вертикальных цилиндрических стержней различных диаметров (10, 12, 14, 16, 18 мм), имеющих со стороны заливки общий литниковый канал, а с противоположной – цилиндрические головки, обеспечивающие затрудненную высокотемпературную деформацию кристаллизующегося металла. Место перехода от литникового канала к цилиндрическим стержням провоцировало образование в этой зоне горячих трещин [5].



Рис. 1. Вид образца пробы горячие трещины

Исследовано четыре пробы с общим количеством образцов 20 шт.

Образцы с диаметром цилиндрического стержня до 14 мм с целью «раскрытия» горячих трещин доламывались на разрывной машине ИР-5143-200-11. Образцы диаметром больше 14 мм с целью обнаружения горячих трещин разрезали вдоль оси стержня.

Определение величины линейной усадки производили с помощью пробы длиной 490 мм с сечением 33x33 мм [5]. Расплавленный металл заливался в форму из ХТС через литник расположенный посередине пробы.

Общий вид образца пробы на определение линейной усадки представлен на рис. 2.



Рис. 2. Образец пробы на линейную усадку



Рис. 3. Общий вид проб для определения объемной усадочной раковины

Определение объемной усадочной раковины. Склонность сталей к образованию усадочных раковин определяли с помощью конусной пробы путем измерения относительного объема концентрированной усадочной раковины.

Образец для определения объемной усадочной раковины представляет собой конус высотой 120 мм, диаметром 36 мм и 100 мм. Образцы для измерений получали путем заливки металла в сухие формы из ХТС, теплоизолированные сверху стержнем из песчано-масляной смеси с древесными опилками. Ровную поверхность верхнего торца пробы обеспечивал кольцевой холодильник толщиной 6 мм, установленный вокруг стержня.

Вид проб для определения объемной усадочной раковины представлен на рис. 3.

После заливки образцов при различной температуре проводили прямые измерения объема усадочных раковин и рассчитывали их относительную величину. Определение объема усадочных раковин проводили путем измерения расхода керосина на их заполнение.

Образцы пробы были разрезаны для осмотра формирования усадочной раковины.

Расчетное и экспериментальное определение температур ликвидус и солидус сталей

В результате выполненных расчетов установлено, что в зависимости от химического состава стали интервал изменения T_L составляет для супердуплексной стали 1455 – 1428⁰С, для стали 12Х18Н12М3ТЛ 1452 – 1412⁰С, среднее значение температуры T_L составляет у супердуплексной стали 1442⁰С, у стали 12Х18Н12М3ТЛ 1432⁰С.

Экспериментальное определение критических температур показало, что для супердуплексной стали – $T_L = 1450^0\text{C}$, для стали 12Х18Н12М3ТЛ – $T_L = 1445^0\text{C}$.

С учетом многолетнего опыта производства стальных отливок из нержавеющей аустенитных сталей, содержащих легирующие элементы, способствующие пленообразованию, температуру заливки опытных отливок приняли на 100⁰ выше, чем T_L .

Расчетную температуру солидус принимали: для супердуплексной стали среднее значение $T_S = 1398^0\text{C}$; для стали 12Х18Н12М3ТЛ среднее значение $T_S = 1361^0\text{C}$.

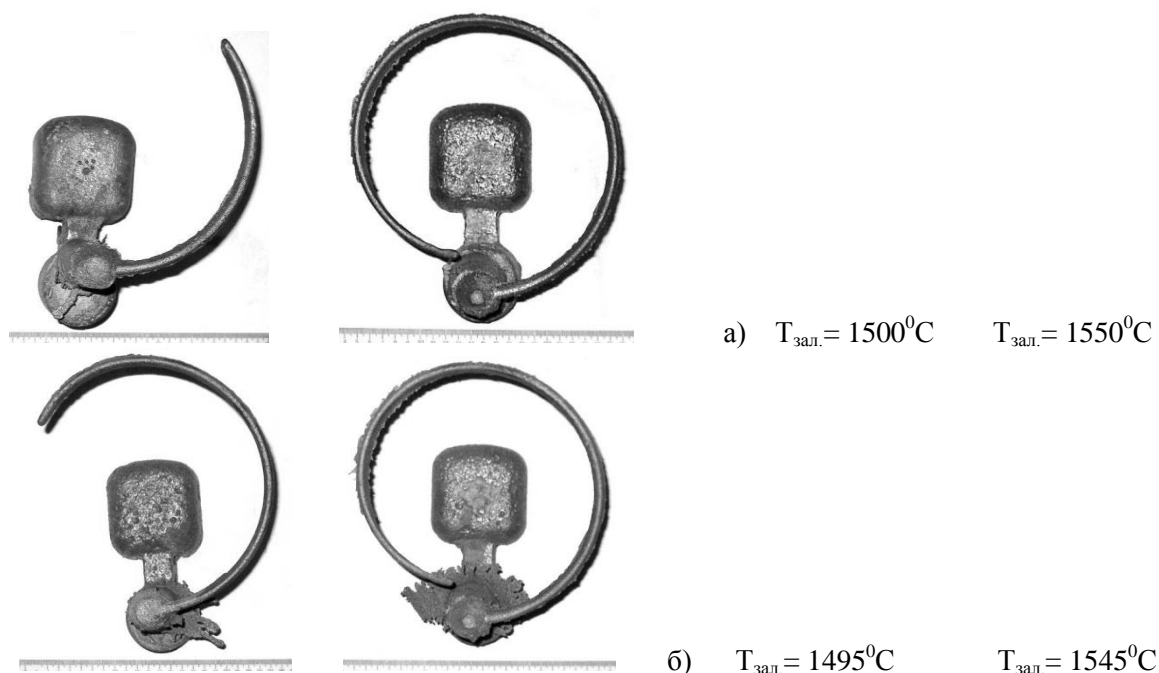


Рис. 4. Вид образцов пробы при определении жидкотекучести стали:
а – сталь супердуплексная; *б* – сталь 12Х18Н12М3ТЛ

Результаты определения жидкотекучести металла. Вид образцов пробы при определении жидкотекучести стали представлен на рис. 4. Результаты определения жидкотекучести металла в зависимости от температуры заливки и величины перегрева 50 и 100⁰С над температурой ликвидус приведены в табл. 2.

Таблица 2

Экспериментальные данные по влиянию температуры заливки на длину спирали

Марка стали	Супер-дуплексная сталь		Сталь 12Х18Н12М3ТЛ	
	$T_{\text{зал.}}, ^\circ\text{C}$	1500	1550	1495
Температура перегрева над линией ликвидус, $^\circ\text{C}$	50	100	50	100
Длина спирали, мм	295	630	460	650

Из табл. 2 видно, что при температурах заливки металла в форму (температура перегрева над температурой ликвидус 100⁰С и 50⁰С) величина жидкотекучести супердуплексной стали меньше в сравнении со сталью марки 12Х18Н12М3ТЛ.

Результаты определения склонности стали к трещинообразованию

При внешнем осмотре поверхности образцов из супердуплексной стали после разрыва на разрывной машине ИР-5143-200-11 и разрезки трещин не обнаружено. В результате осмотра образцов из стали марки 12Х18Н12М3ТЛ после разрыва и разрезки обнаружено восемь отдельных горячих трещины в местах затрудненной усадки.

Фотографии изломов образцов из стали 12Х18Н12М3ТЛ представлены на рис. 5.



Рис. 5. Горячие трещины в образцах диаметром 10 и 12 мм из стали марки 12Х18Н12М3ТЛ

Относительную трещиностойкость сталей можно определить как соотношение количества образцов без трещин к общему количеству образцов. В результате расчета установлено, что относительная трещиностойкость у аустенитной стали в 2,5 раза ниже, чем у супердуплексной стали.

По результатам определения трещиностойкости можно сделать вывод, что супердуплексная сталь не склонна, а сталь 12Х18Н12М3ТЛ склонна к образованию горячих трещин.

Полученные данные не противоречат общепринятым представлениям, так как из тео-

рии и практики известно, что двухфазные аустенитно-ферритные стали менее подвержены образованию горячих трещин, чем однофазные аустенитные. Следовательно, выбранная проба позволяет определять склонность сталей к образованию горячих трещин.

Результаты определения линейной усадки металла приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения линейной усадки металла (%)

№ образца	Супердуплексная сталь	Сталь 12X18H12M3T
1	2,4	2,0
2	2,2	2,1
3	2,5	2,1
Средние значения	2,4	2,1

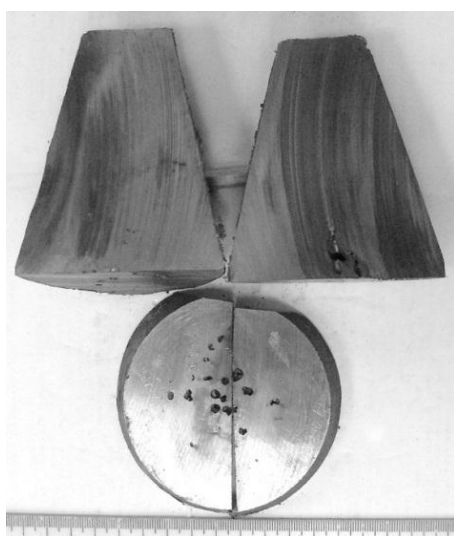


Рис. 6. Вид усадочных раковин в образце пробы из супердуплексной стали

Как следует из приведенных данных, линейная усадка супердуплексной стали заметно больше, чем у аустенитной стали 12X18H12M3TЛ, что необходимо учитывать при разработке литейной технологии.

Результаты определения объемной усадочной раковины

Установлено, что при температуре заливки супердуплексной стали, близкой к температуре ликвидус, концентрированная усадочная раковина отсутствует, возникает усадочная пористость (рис. 6). Глубина залегания пористости по высоте пробы ~ (30 – 46)%.

В образцах проб из стали 12X18H12M3TЛ наблюдаются усадочные раковины открытого типа (рис. 7). Глубина залегания усадочных раковин по высоте пробы 20–38%.

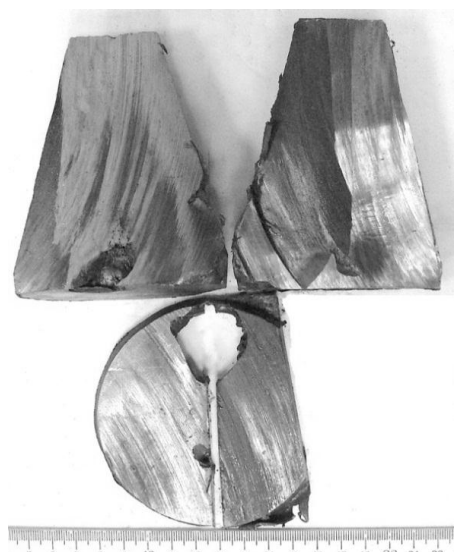


Рис. 7. Вид усадочных раковин в образцах проб из стали 12Х18Н12М3ТЛ

В табл. 4 представлены результаты измерения усадочных раковин, полученных при различных температурах металла.

Таблица 4**Влияние температуры металла на объем усадочной раковины $V_{ус}$**

Марка стали	Супердуплексная сталь			Сталь 12Х18Н12М3ТЛ		
	1450	1480	1513	1431	1460	1500
$T, ^\circ\text{C}$	1450	1480	1513	1431	1460	1500
$V_{ус}, \%$	1,92	2,32	2,70	1,72	1,93	2,20

Относительный объем усадочной раковины супердуплексной стали в сравнении со сталью марки 12Х18Н12М3ТЛ больше на 8% при температуре заливки 1450°C и на 17% при температуре заливки 1500°C .

Технологические рекомендации и указания

На основании сравнения литейных свойств исследуемых сталей рекомендуется при разработке технологических процессов изготовления отливок предусматривать следующее:

- увеличенный радиус галтелей во внутренних углах и литейные ребра жесткости, особенно для стали марки 12Х18Н12М3ТЛ, т.к. эта сталь обладает пониженной трещиностойкостью;
- температуру металла в процессе плавки не выше 1650°C , а перед выпуском – не выше 1600°C ;
- увеличенную высоту прибылей на отливках из супердуплексной стали на 8 – 10% по сравнению с прибылями на отливках из стали 12Х18Н12М3ТЛ;
- температуру заливки стали в зависимости от толщины стенки и массы отливки выбирать в диапазоне $1540\text{--}1560^\circ\text{C}$ для супердуплексной стали, $1530\text{--}1550^\circ\text{C}$ для стали 12Х18Н12М3ТЛ.

Разработаны технологические указания на выплавку супердуплексной стали и стали 12Х18Н12М3ТЛ в индукционных печах и отливку заготовок в песчаные формы, которые содержат требования по химическому составу выплавляемых сталей, к исходным шихтовым материалам, ферросплавам и шлакообразующим, к порядку ведения плавки, к выпуску и разливке стали.

Внедрение разработанной технологии

Изготовлены в соответствии с разработанными технологическими указаниями опытные литые заготовки–представители судовой арматуры из супердуплексной стали и стали 12Х18Н12М3ТЛ для стендовых испытаний и выполнена оценка качества металла.

Внешний осмотр не выявил на поверхности металла недопустимых дефектов.

При гидравлических испытаниях корпусов на давление 40 кгс/см^2 протечек не обнаружено.

Термическая обработка заготовок корпусов судовой арматуры была проведена по ГОСТ 977. Супердуплексную сталь термически обрабатывали по режимам стали 12Х18Н9ТЛ.

Выполнена оценка механических свойств металла проб на растяжение по ГОСТ 1497 и на ударный изгиб по ГОСТ 9454 после термической обработки показала, что механические свойства металла соответствуют требованиям, предъявляемым к литой стали для изделий судовой арматуры.

Вид заготовок корпусов арматуры представлен на рис. 8.

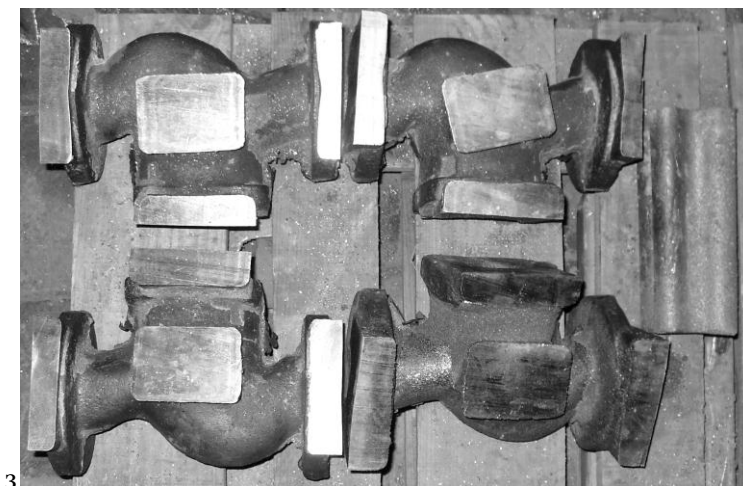


Рис. 8. Заготовки корпусов арматуры

Выводы

По литейным свойствам исследованные стали отличаются друг от друга следующим образом:

1. Большие значения температуры ликвидус T_L 1450⁰С и солидус T_S 1398⁰С (расчет) соответствуют супер - дуплексной стали, меньшие – $T_L = 1445^0$ С, $T_S = 1361^0$ С (расчет) у стали 12Х18Н12М3ТЛ.

2. При температуре заливки металла в форму с перегревом над T_L на 50⁰С величина жидкотекучести дуплексной стали в сравнении со сталью марки 12Х18Н12М3ТЛ существенно меньше.

3. Супердуплексная сталь более стойкая к образованию горячих трещин, чем сталь марки 12Х18Н12М3ТЛ.

4. Линейная усадка супердуплексной стали составила 2,2–2,5%, стали 12Х18Н12М3ТЛ 2, – 2,1%;

5. Относительный объем усадочной раковины супердуплексной стали в сравнении со сталью марки 12Х18Н12М3ТЛ больше на 8% при температуре заливки 1450⁰С и на 17% при температуре заливки 1500⁰С.

6. Разработана технология на выплавку супердуплексной стали и стали 12Х18Н12М3ТЛ в индукционных печах и отливку. Технология внедрена при изготовлении опытных литых заготовок корпусов судовой арматуры из этих сталей для стендовых испытаний.

Библиографический список

1. **Калинин, Г.Ю.** Исследования структуры и свойств высокопрочной азотистой стали 04Х20Н6Г11М2АФБ / Г.Ю. Калинин [и др.]. // Вопросы материаловедения, 2006. №1(45). С. 45–59.
2. **Приданцев, М.В.** Высокопрочные аустенитные стали / М.В. Приданцев [и др.]. – М.: Metallurgy, 1969. – 247 с.
3. Научно-технический отчет ОАО ННИИММ «Прометей». 1994.
4. Сайт компании (США) Swagelok.com.
5. **Грузных, И.В.** Литейные свойства сталей и повышение качества отливок / И.В. Грузных, Г.П. Кочкарева. – Ленинград: ЛДНГП, 1975. – 24 с.

Дата поступления
в редакцию 16.04.2015

**N. Tumakova¹, V. Tikhonov¹, A. Smirnov¹, S. Samokhvalov¹, A. Bolshakov²,
V. Nazarov³, I. Leushin⁴**

**RESEARCH CASTING PROPERTIES OF SUPER DUPLEX AND SERIAL
AUSTENITIC STEEL, TECHNOLOGY
DEVELOPMENT AND MANUFACTURING OF CASTINGS, VALVE BODIES**

JSC Nizhny Novgorod scientific research Institute of machine-building materials "Prometey",
Nizhny Novgorod¹,

JSC "Experimental design Bureau of machine building them. I. I. Afrikantov", Nizhny Novgorod²,
LLC Scientific-production center "Epsilon", Nizhny Novgorod³,
Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev⁴

The results of comparative studies of fluidity, resistance to cracking, mold shrinkage promising super - duplex steels austenitic - ferritic class and series austenitic steel 12X18H12M3TЛ in relation to the development of manufacturing technology of ship fittings in the domestic foundry acquired in exchange for imports . It is shown that super - duplex steel in comparison with austenitic steel has several large values of temperatures of liquidus, solidus and shrinkage, less fluidity and significantly less prone to hot cracking. Given technological recommendations made by experienced cast billet housings ship fittings and evaluated their quality . Thus, confirmed the possibility of producing valves with application of advanced steel instead of expensive fittings to be purchased abroad.

Key words: super - duplex steel, casting properties, ship fittings, corrosion resistance, durability.