

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.039.53

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ
НА ПРОЧНОСТЬ РЕАКТОРНОЙ Cr – Ni – Mo – V СТАЛИ**

© 2017 Н.Н. Подрезов, И.С. Подрезова

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

В работе рассмотрены вопросы влияния структурной наследственности на комплекс механических свойств обечаек зоны патрубков из реакторной стали в процессе изготовления корпуса водо-водяного реактора. Показано, что проявления структурной наследственности оказывают негативное воздействие при наличии в обечайках первичного аустенитного зерна балла № 3 согласно ГОСТ 5639.

Ключевые слова: структурная наследственность, обечайка зоны патрубков, прочность, механические свойства, микроструктура, закалка с отпуском.

Поступила в редакцию: 07.12.2017.

В настоящее время для изготовления корпусов водо-водяных реакторов ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, ВВЭР-ТОИ применяется сталь 15X2НМФА (15X2НМФА-А, 15X2НМФА класс 1), обладающая ярко выраженной структурной наследственностью [1]. В ряде случаев полиморфное превращение $\alpha \rightarrow \gamma$ в стали не сопровождается перекристаллизацией, что означает сохранение размера зерна стали после такой термообработки [2]. В этом и заключается эффект проявления структурной наследственности. В случае сохранения мелкого зерна – наследственность мелкозернистая, крупного – крупнозернистая.

Сталь 15X2НМФА – теплоустойчивая, легированная, бейнитного класса. Для таких сталей основным способом достижения необходимого комплекса эксплуатационных механических свойств является перекристаллизация с измельчением аустенитного зерна [3]. Отсюда понятно, что если исходная структура поковок является мелкозернистой, то эффект наследования «протащит» высокий уровень механических свойств через термообработки на различных стадиях изготовления обечаек (сварка, штамповка и т.п.), так как наследоваться будет мелкое зерно. Известно [4], например, о положительном опыте использования явления структурной наследственности в низкоуглеродистых мартенситных трубных сталях типа 12X2Г2НМФТ.

К сожалению, несмотря на всю мощь современной металлургии, реакторные стали в крупнотоннажных слитках массой более 150 тонн имеют крупнозернистую основу, а, стало быть, и наследственность. Интенсивный рост аустенитного зерна наблюдается при ковке крупных полуфабрикатов с критической степенью деформации при высокой температуре. Процесс идёт за большое число печных выносов, некоторые части поковки могут подвергаться высокотемпературному нагреву без последующей пластической обработки, что также приводит к значительному увеличению размера зерен и ярко выраженной разнотонности [5]. По данным ОАО «Ижорские заводы»,

размер зерна в крупногабаритных обечайках из стали марки 15X2НМФА кл.1 после предварительной термической обработки колеблется от 5-го до минус 3-го балла [6].

Крупнозернистая наследственность может проявляться весьма неожиданно в заводских условиях и приводить к парадоксальным, на первый взгляд, результатам [7]. В качестве иллюстрации ниже приведены результаты исследования причин заниженных значений предела прочности σ_B и текучести $\sigma_{0,2}$ основного металла двух обечаек патрубковой зоны реактора ВВЭР-1000 (рисунок 1) при температуре испытаний +350 °С (таблица 1).

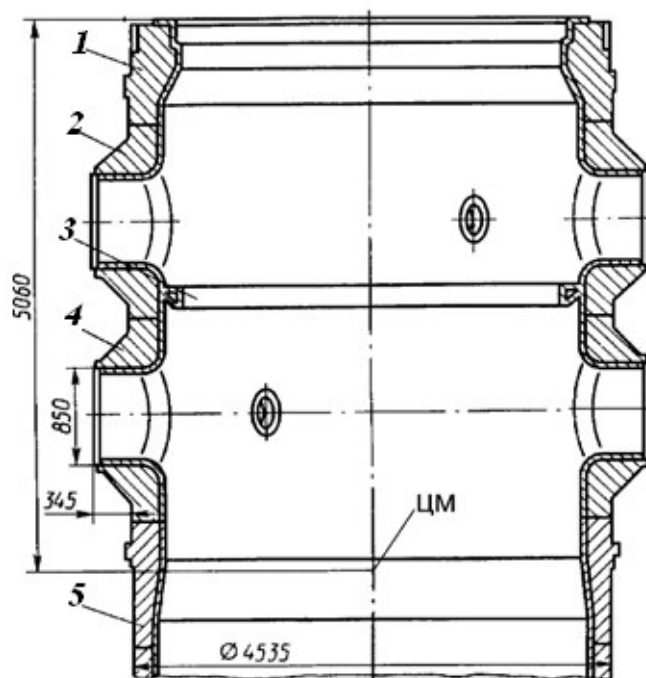


Рис. 1. – Зона патрубков ВВЭР-1000

- 1 – фланец; 2 – обечайка верхняя зоны патрубков; 3 – кольцо разделительное;
4 – обечайка нижняя зоны патрубков; 5 – обечайка опорная
[The area of WWER-1000 nozzles
1 - flange; 2 - shell of nozzle upper zone; 3 - separating ring;
4 - shell of nozzle lower zone; 5 - support shell]

Механические свойства обечаек до выштамповки патрубков соответствовали требованиям ТУ согласно сертификатным данным. Обечайки после выштамповки патрубков с многократным нагревом до температуры 1100...1150 °С отжигались для снятия напряжений при 600...700 °С в течение 30 часов. Далее для обеспечения необходимого запаса прочностных свойств обечайки прошли основную термическую обработку по режиму А (двойная закалка с отпусками, таблица 1) и дополнительные технологические отпуска, после чего проводили испытания.

По результатам штатных испытаний было установлено, что все показатели комплекса механических свойств (прочность, пластичность, ударная вязкость и температура хрупко-вязкого перехода T_{k0}) при +20 и +350 °С удовлетворяют требованиям ТУ 0893-013-00212179-2003 [8], кроме указанных курсивом σ_B и $\sigma_{0,2}$ в таблице 1. Для повышения прочностных характеристик была проведена повторная двойная закалка по режиму А с дополнительными отпусками, которые не дала положительного результата.

По этой причине макро- и микроструктурные исследования проводили

непосредственно на образцах, отобранных с наружной и внутренней стороны каждой из обечаек по штатной технологии (отбором трепанов).

Изучение макроструктуры всех обечаек на микроскопе МБС-9 при увеличении до $\times 40$ показало, что она одинакова и характеризуется слабой степенью загрязнения неметаллическими включениями. Размер зёрен изменялся по сечению обечайки, постепенно увеличиваясь от внутренней к наружной поверхности.

Результаты микроструктурных исследований на половинках разрывных образцов с удовлетворительными и неудовлетворительными значениями σ_B при $+350$ °С приведены на рисунке 2.

Образцы с низким значением σ_{B+350} (рисунок 2а, г) после первой двойной закалки имеют структуру грубоиглочатого бейнита, балл зерна №3, ГОСТ 5639 [9]. На образцах с высоким значением σ_{B+350} (рисунок 2б) выявлена структура верхнего мелкозернистого бейнита, балл зерна № 6. После повторной двойной закалки по режиму А и дополнительных технологических отпусков структура образцов с низкими значениями σ_{B+350} (рисунок 2 в) не претерпевает никаких изменений, а исходный размер зерна сохраняется.

Таблица 1. – Механические свойства обечаек зоны патрубков корпуса реактора [Mechanical properties of the shells of the reactor vessel nozzles]*

№ обечайки	Режим термообработки после выштамповки патрубков	Температура испытаний $+350$ °С	
		σ_B , МПа (не ниже 540)	$\sigma_{0,2}$, МПа (не ниже 440)
1	А + дополнительные технологические отпуска	598 510	520 402
	повторно А + дополнительные технологические отпуска	520 539	397 451
2	А + дополнительные технологические отпуска	530 539	456 451
	повторно А + дополнительные технологические отпуска	530 579	445 520

* Примечания
 1- А - закалка (950 ± 10 °С; 10 час), охлаждение в воду + отпуск (650 ± 10 °С; 3,5 час) + закалка (920 ± 10 °С; 10 час), охлаждение в воду + отпуск (650 ± 10 °С; 30 час);
 2- курсивом показаны неудовлетворительные свойства

Таким образом, повысить прочность реакторной стали при $+350$ °С в зоне патрубков не удалось даже после четырёх закалок – налицо проявление крупнозернистой структурной наследственности. Крупное зерно сформировалось в процессе выштамповки патрубков при многочисленных нагревах под штамповку до температуры $1100...1150$ °С. Высокая стабильность переохлажденного аустенита сталей этого класса создает предпосылки для сохранения в них отрицательного влияния крупнозернистости, обусловленной предшествующими высокотемпературными цикламиковки, штамповки, электрошлаковой и других методов сварки [10, 11]. Следовательно очень велико значение предварительной термической обработки

Cr – Ni – Mo – V стали, применяемой для формирования мелкозернистой гомогенной структуры, ещё на стадии получения поковок из крупнотоннажных слитков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

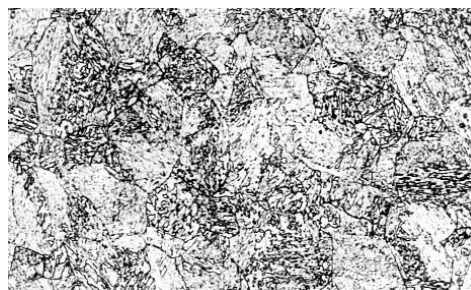
1) В Cr – Ni – Mo – V сталях проявление структурной наследственности связано с высокой стабилизацией матричного аустенита и образованием кристаллографически упорядоченных структур по бездиффузионному механизму (мартенсит, бейнит) на стадии охлаждения аустенитной фазы и её последующего восстановления при нагреве выше A_{c3} [12, 13].

2) Разработка режимовковки, штамповки и предварительной термической обработки с целью получения мелкого зерна (не ниже балла №6 для крупных поковок) является едва ли не первостепенной задачей на фоне создания в последние годы чистых, т.е. практически беспримесных корпусных сталей.

3) Для подавления крупнозернистой наследственности, приводящей в заводских условиях к неудовлетворительным механическим свойствам по прочности или T_{k0} , необходимо применять нетрадиционные подходы [14, 15] по выбору режимов термической или термомеханической обработки.



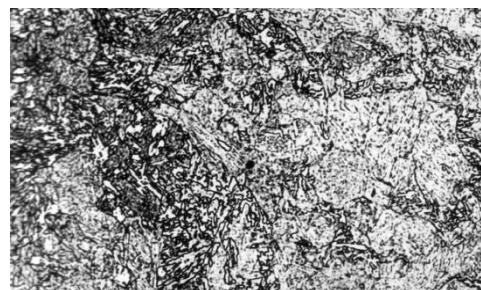
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. – Микроструктура металла зоны патрубков, сталь 15X2НМФА, $\times 100$:

а - $\sigma_{B+350} = 530$ МПа, режим А + дополнительные отпуска, обечайка №1;

б - $\sigma_{B+350} = 598$ МПа, режим А + дополнительные отпуска, обечайка №1;

в - $\sigma_{B+350} = 520$ МПа, повторно режим А + дополнительные отпуска, обечайка № 1;

г - $\sigma_{B+350} = 530$ МПа, режим А + дополнительные отпуска, обечайка №2 [Metal microstructure of the nozzle zone, steel 15X2NMFA, $\times 100$: а - $\sigma_{B+350} = 530$ МПа, mode А + additional drawbacks, shell №1; б - $\sigma_{B+350} = 598$ МПа, mode А + additional drawbacks, shell №1; в - $\sigma_{B+350} = 520$ МПа, again mode А + additional drawbacks, shell № 1; г - $\sigma_{B+350} = 530$ МПа, mode А + additional drawbacks, shell №2]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернобаева, А.А. Исследование влияния температурно-временных параметров термической обработки на структурную наследственность стали 15X2НМФА [Текст] / А.А. Чернобаева : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1989. – 22 с.
2. Марков, С.И. и др. Влияние размера аустенитного зерна на механические свойства стали 15X2НМФА [Текст] / С.И. Марков, Г.С. Карк, А.А. Чернобаева // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий.

- Запорожье: ЗМИ им. В.Я. Чубаря, 1986. – С. 106.
3. *Бернштейн М.Л.* Прочность стали [Текст]/М.Л. Бернштейн. – М.: Металлургия, 1974. – 200 с.
 4. *Югай С.С. и др.* Структурная наследственность в низкоуглеродистых мартенситных сталях / С.С. Югай, Л.М. Клейнер, А.А. Шацов, Н.Н. Митрохович // МиТОМ. – 2004. – № 12. – С. 24–29.
 5. *Дурынин, В.А., и др.* Исследование качества крупногабаритной обечайки из 360-т слитка стали 15X2НМФА для атомного реактора [Текст] / В.А. Дурынин, Т.И. Титова, Г.П. Матвеев, С.Ю. Баландин // Электрометаллургия. – 2003. – №9. – С. 45–48.
 6. *Филимонов, Г.Н. и др.* Технологические аспекты, обеспечивающие создание корпусных материалов для водо-водяных реакторов повышенной безопасности и ресурса [Электронный ресурс] / Г.Н. Филимонов, В.В. Цуканов, И.И. Грекова, И.И. Теплухина, В.В. Дюков, Т.И. Титова, Н.А. Шульган, И.И. Храпов // База данных Refdb: сетевой журн. – 2012. – Режим доступа: URL: <https://refdb.ru/look/1978467.html> – 10.11.2017.
 7. Dang, S.-E., He, Y., Liu, Y., Su, Z.-N. Structural heredity of 30Cr2Ni4MoV steel. Cailiao Rechuli Xuebao. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, №35. pp. 61–65.
 8. Технические условия ТУ 0893-013-00212179-2003. Заготовки из стали марок 15X2НМФА, 15X2НМФА-А, 15X2НМФА класс 1 для корпусов, крышек и других узлов реакторных установок [Текст]. – М., 2003. – С. 26.
 9. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна [Текст]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. – С. 16.
 10. *Марков, С.И.* Металловедческие основы производства заготовок для высоконадежных элементов энергетических и трубопроводных систем [Текст] / С.И. Марков : автореф. дис..... д-ра техн. наук. – М., 2012. – С. 83.
 11. *Подрезов Н.Н.* Разработка технологических основ чистых корпусных сталей [Текст] / Н.Н. Подрезов: автореф. дис..... канд. техн. наук. – М., 2017. – С. 160
 12. *Садовский, В.Д.* Структурная наследственность в стали [Текст] / В.Д. Садовский. – М.: Металлургия, 1973. – 205 с.
 13. *Умова, В.М. и др.* Влияние структурной наследственности на рост зерна аустенита при нагреве стали [Текст] / В.М. Умова, В.Д. Садовский // Физика металлов и металловедение. – 1979. – Том 47(4). – С. 802–808.
 14. *Счастливец, В.М. и др.* Исправление структуры и изломов перегретой конструкционной стали [Текст] / В.М. Счастливец, А.Б. Кутьин, М.А. Смирнов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 190 с.
 15. Chen J.R., Gu K.F., Han L.Z. et al. Novel process to refine grain size of NiCrMoV steel. Materials Science and Technology. Issue 7: Simulation of alloy structure and properties, 2012, Volume 28, pp. 773–777 .

REFERENCES

- [1] Chernobaeva A.A. Issledovanie vlijaniya temperaturno-vremennykh parametrov termicheskoy obrabotki na strukturnuju nasledstvennost stali 15Kh2NMFA [Investigation of the effect of temperature-time parameters of heat treatment on structural heredity of steel 15X2НМФА] Avtoreferat na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Author's abstract. dis. ... cand. tech. Sciences]. M. 1989, 22 p. (in Russian)
- [2] Markov S.I., Kark G.S., Chernobaeva A.A. Vlijanie razmera austenitnogo zerna na mekhanicheskie svojstva stali 15Kh2NMFA [Influence of the size of austenitic grain on the mechanical properties of 15X2НМФА steel]. [New structural steels and alloys and methods for their processing to improve the reliability and durability of products]. Zaporozhye: ZMI im. V.Ja. Chubarja [ZMI of them. V.Ya. Chubarya], 1986, p. 106. (in Russian)
- [3] Bernshtejn M.L. Prochnost' stali [The strength of steel]. M. Pub. Metallurgiya, 1974, 200 p. (in Russian)
- [4] Iugai S.S., Kleiner L.M., Shatsov A.A., Mitrokhovich N.N. Strukturnaia nasledstvennost' v izkouglерodistykh martensitnykh staliakh [Structural heredity in the low-carbon martensitic steels]. Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov, 2004, №12, pp. 24–29. (in Russian)
- [5] Durinin V.A., Titova T.I., Matveev G.P., Balandin S.Yu. Issledovanie kachestva krupnogabaritnoj obechajki iz 360-t slitka stali 15Kh2NMFA dlja atomnogo reaktora [Study of the quality of a large-sized shell of 360-ton of ingot 15X2НМФА for an atomic reactor]. Ehlektrometallurgija [Electrometallurgy], 2003, №9, pp. 45–48. (in Russian)
- [6] Filimonov, G.N. Tsukanov V.V., Grekova I.I., Teplukhina I.I., Dyukov V.V., Titova T.I., Shulgan N.A., Snoring I.I. Tekhnologicheskie aspekty, obespechivajushhie sozdanie korpusnykh materialov

- dlja vodo-vodjanykh reaktorov povyshennoj bezopasnosti i resursa [Technological aspects that provide the creation of hull materials for water-cooled reactors of increased safety and resource]. Database Refdb: network log, 2012. Available at: <https://refdb.ru/look/1978467.html> (in Russian)
- [7] Dang, S.-E., He, Y., Liu, Y., Su, Z.-N. Structural heredity of 30Cr2Ni4MoV steel. Cailiao Rechuli Xuebao. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, №35. pp. 61–65. (in English)
- [8] Tekhnicheskie uslovija TU 0893-013-00212179-2003.Zagotovki iz stali marok15Kh2NMFA, 15Kh2NMFA-A, 15Kh2NMFA klass 1 dlja korpusov, kryshek i drugikh uzlov reaktornykh ustanovok [Technical specifications TU 0893-013-00212179-2003. Blanks from steel grade 15X2HMΦA, 15X2HMΦA-A, 15X2HMΦA class 1 for cases, covers and other units of reactor installations]. M. 2003, 26 p. (in Russian)
- [9] GOST 5639-82. Stali i splavy. Metody vyjavlenija i opredelenija velichiny zerna [GOST 5639-82. Steels and alloys. Methods for the detection and determination of grain size]. M. Pub. IPK Izdatelstvo standartov [IPK Publishing house of standards], 2000. p. 16. (in Russian)
- [10] Markov S.I. Metallovedcheskie osnovy proizvodstva zagotovok dlja vysokonadezhnykh ehlementov ehnergeticheskikh i truboprovodnykh sistem [Metal science bases of production of blanks for highly reliable elements of power and pipeline systems]. M. 2012, p. 83. (in Russian)
- [11] Podrezov N.N. Razrabotka tekhnologicheskikh osnov chistykh korpusnyh stalej [Development of technological fundamentals of pure hull steels]. M. 2017, p. 160 (in Russian)
- [12] Sadovsky V.D. Strukturnaja nasledstvennost v stali [Structural heredity in steel]. M. Pub. Metallurgy, 1973, 205 p. (in Russian)
- [13] Umov V.M., Sadovskii V.D. The effect of structural heredity in grain growth of austenite during heating of steel. Physics of metals and metallography, 1979, Volume 47(4), pp. 802–808 (in Russian)
- [14] Schastlivcev V.M., Kutin A.B., Smirnov M.A. Ispravlenie struktury i izlomov peregretoj konstrukcionnoj stali [The correction of the structure and fractures of the superheated structural steel]. Ekaterinburg. Pub. Ural branch RAS, 2003, 190 p. (in Russian)
- [15] Chen J.R., Gu, K.F., Han L.Z. et al. Novel process to refine grain size of NiCrMoV steel. Materials Science and Technology. Issue 7: Simulation of alloy structure and properties, 2012, Volume 28, pp. 773–777 (in English)

Influence of Structural Heredity on Strength of the Reactor Cr-Ni-Mo-V Steel

N.N. Podrezov*, I.S. Podrezova**

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University “MEPhI”,
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

e-mail: VITikafMPM@mephi.ru

** ORCID: 0000-0002-0314-2413*

WoS ResearcherID: G-3892-2017;

*** ORCID: 0000-0003-4480-0707*

WoS ResearcherID: V-2309-2017

Abstract – The paper considers the influence of structural heredity on the complex of mechanical properties of shells in the zone of branch pipes from reactor steel in the process of manufacturing the hull of a water-cooled reactor. It is shown that the manifestations of structural heredity have a negative effect in the presence in the shells of primary austenitic grains score No. 3 according to GOST 5639.

Keywords: the structural heredity, the shell of the nozzle zone, strength, mechanical properties, microstructure, hardening with tempering.