

УДК 620.186.5

Д.В. Чуприн, Е.В. Терентьев, И. Ключникова, К.Т. Бородавкина

НИУ «МЭИ»
Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА НА МИКРОСТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ СТАЛИ 15X2НМФА

***Аннотация.** Влияние высоких температур на сталь 15X2НМФА ведет к увеличению размера первичного аустенитного зерна и негативно влияет на механические свойства. Целью данной работы является установление зависимости размера зерна и твердости стали от температуры нагрева. Согласно полученным результатам, нагрев выше 950 °С не рекомендуется ввиду увеличения зерен.*

***Ключевые слова:** аустенитное зерно, размер зерна, сталь 15X2НМФА, твердость, микроструктура.*

**D.V. Chuprin, E.V. Terentyev, I. Klyuchnikova,
K.T. Borodavkina**

National Research University "MREI"
Moscow, Russia

***Abstract.** The influence of high temperatures on 15X2NMFA steel leads to an increase in the size of the primary austenitic grain and negatively affects the mechanical properties. The purpose of this work is to establish the dependence of the grain size and hardness of steel on the heating temperature. According to the results obtained, heating above 950 °C is not recommended due to the increase in grains.*

***Keywords:** austenitic grain, grain size, steel 15X2NMFA, hardness, microstructure.*

Введение

Научно-технический прогресс ведет к росту энергопотребления, что обуславливает развитие энергетики все более быстрыми темпами. В области атомной энергетики, наряду с продлением срока службы действующих реакторов, ведется разработка новых типов ядерноэнергетических установок с параметрами, которые смогут соответствовать современным требованиям по электрической мощности, безопасности, экономической эффективности и экологичности. В соответствии с нуждами общества ведутся работы по созданию проектов реакторов типа ВВЭР различной мощности, что в свою очередь связано с сильными различиями в параметрах теплоносителя, различиями в эксплуатационных параметрах для ряда конструктивных узлов реактора.

Для изготовления корпусов и крышек реакторов АЭС широко используется сталь 15X2НМФА, обладающая высоким комплексом служебных и технологических свойств для деталей активной зоны вплоть до температур эксплуатации 350-400 °С. Однако при воздействии более высоких температур стали феррито-перлитного класса склонны к росту зерен, оказывающему негативное влияние на механические характеристики: при уменьшении размеров зерна увеличивается пластичность, вязкость, прочность, а также изделие становится более устойчивым к деформациям. При перегреве металлической поверхности зерновые габариты растут, и, как следствие, появляется предрасположенность к хрупкости, появлению трещин.

Данное исследование было направлено на изучение зависимости размера аустенитного зерна от температуры нагрева стали 15X2НМФА и последующей закалки.

Методика исследования

Образцы из стали 15X2НМФА нагревались в муфельной печи до температур в диапазоне от 700-1200°С с последующим охлаждением в воду. Из полученных образцов изготавливались шлифы по стандартной методике: запрессовка в компаунд, шлифовка на карбидо-кремниевой бумаге зернистостью P80-P1000, полировка с использованием полировальных сукон и суспензий зернистостью 1-0,05 мкм. Для выявления микроструктуры поверхность образцов травили реактивом состава 100 мл этилового спирта, 5 мл соляной кислоты, 1 г пикриновой кислоты.

Микроструктуру стали 15X2НМФА изучали с помощью оптического микроскопа Zeiss Observer Z1m с программным обеспечением AxioVision. Размер зерна аустенита оценивали с использованием метода подсчета пересечений зерен, в соответствии с ГОСТ 5639-82.

Измерение твердости по методу Виккерса проводилось с нагрузкой 10 кгс и временем выдержки 10 секунд по 3 измерения на каждом из образцов для исключения влияния случайных факторов.

Результаты исследования

В таблице 1 представлены результаты измерения среднего условного диаметра зерна d_L и твердости HV10.

Для визуализации полученных результатов была построена зависимость измеряемых параметров от температуры нагрева под закалку (рис. 1).

Таблица 1 – Результаты измерения среднего условного диаметра зерна и твердости

№ образца	Средний условный диаметр зерна d_L , мм	Твердость HV10, кгс/мм ²			
		№ измерения			Среднее значение
		1	2	3	
700	0,109	220,8	228,5	218,1	223,22
720	-	210,9	210,8	209,9	211,64
730	0,091	215,9	212,9	213,5	215,22
740	-	202,7	197,9	199	201,48
750	-	200,7	202,2	205	202,66
760	0,088	201,1	199,9	198,6	199,08
770	0,094	237,4	243,7	225,4	241,08
780	0,083	262,4	285,7	260,9	267,76
790	0,084	353,9	339	350,9	351
800	0,082	370,4	368,4	365,5	367,3
810	0,017	391,3	391,1	411,1	393,4
820	0,017	400,1	398,2	402,7	398,52
830	0,03	411,6	414	410,5	409,8
837	0,017	416,9	437,2	434,5	429,7
850	0,035	437,6	426	435,1	428,76
900	0,051	407	416,9	415,5	414,44
950	0,057	415,9	449,1	417,5	421,56
1000	0,099	379,7	384,9	389	385,62
1050	0,089	398,4	400,1	414,8	404,44
1100	0,091	389,7	386,5	390	387
1200	0,33	370,7	370,9	377,8	368,68

Из рис. 1 видно, что средний размер зерна при температурах ниже 800°C значительно не изменяется, однако после нагрева до 810°C, что соответствует линии Ас3, резко уменьшается. При дальнейшем повышении температуры до 1100°C размер зерна непрерывно возрастает до 0,1 мм, а последующий нагрев на 100°C приводит к резкому увеличению размера зерна более чем в 3 раза.

Значения твердости стали 15Х2НМФА в диапазоне температур от 700°C до 760°C снижаются до 200HV10. Однако, при температурах нагрева выше 760°C твердость начинает возрастать, достигая своего максимального значения в 430HV10 при 850°C, после чего плавно снижается.

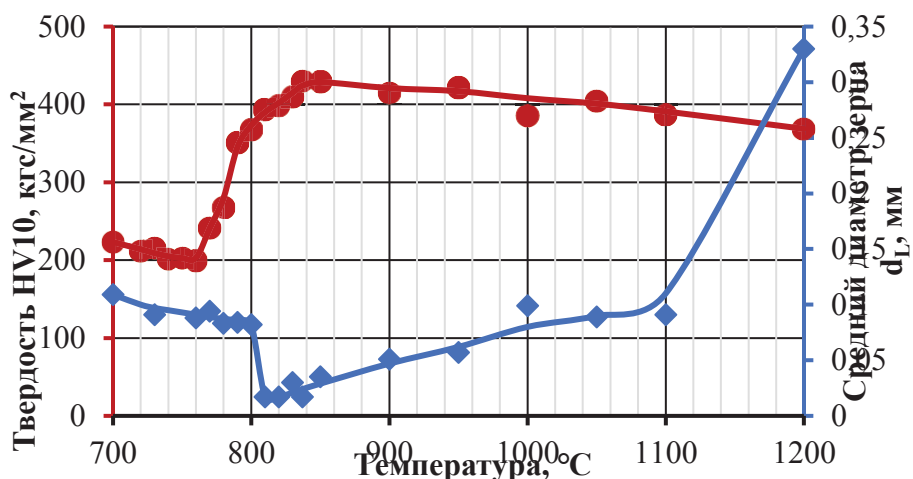
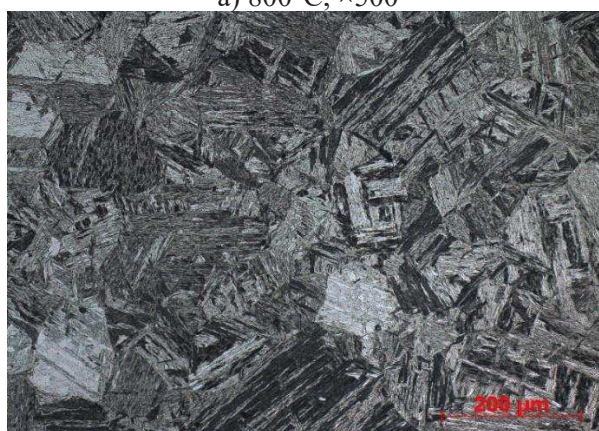


Рис. 1 – Зависимость твердости и среднего диаметра зерна от температуры нагрева под закалку

На рис. 2 представлена микроструктура исследуемых образцов, нагретых под закалку до температур 800°C и 1000°C. Очевидно, что при нагреве до температур выше линии Ac3 происходит полное растворение фаз в аустените, за счет чего при дальнейшем его охлаждении образуется только мартенситная структура (рис. 2, б).



а) 800°C, ×500



б) 1100°C, ×200

Рис. 2 – Микроструктура образцов после закалки с различных температур

Выводы

В результате исследования и проведенных расчетов по ГОСТ 5639-82 были выделены следующие зависимости размера зерна от температуры: при нагреве выше температуры Ас3 размер зерен резко снижается с 0,082 мм до 0,017 мм. С температуры 850°C наблюдается непрерывный рост зерна и достигает максимального размера при 1200°C.

Исходя из полученных зависимостей могут быть сформулированы следующие выводы:

1. При термической обработке реакторной стали 15X2НМФА нагрев выше 950°C не рекомендуется во избежание получения крупнозернистой структуры.
2. Были получены результаты зависимости твердости от температуры. При температуре 650°C твердость металла начинает возрастать и после 850°C постепенно снижается.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-10140).*

Список использованных источников

1. Loktionov V., Lyubashevskaya I., Sosnin O., Terentyev E. Short-term strength properties and features of high-temperature deformation of VVER reactor pressure vessel steel 15Kh2NMFA-A within the temperature range 20–1200 °C Nuclear Engineering and Design. 2019. V.352. 110188.
2. С.И. Марков, В.А. Дурынин, В.А. Мохов. Сталь марок 15X2НМФА, 15X2НМФА-А и 15X2НМФА класс 1 для корпуса реактора проекта ВВЭР-ТОИ. Тяжелое машиностроение, № 3. 2013 г.
3. Б.А. Гурович, Е.А. Кулешова, А.С. Фролов, Д.А. Журко, Д.Ю. Ерак, Д.А. Мальцев, В.М. Комолов. Структурные исследования сталей корпусов реакторов для нового поколения реакторов типа ВВЭР // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и явлений в твердых телах. – 2013. – №2(84).
4. ГОСТ 5639-82 "Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна" Steels and alloys. Methods for detection and determination of grain size.