

**Г.Б. Свиридов, А.Ю. Марченков, А.А. Панькина**

НИУ «МЭИ»

Москва, Россия

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 15X2НМФА-А МЕТОДОМ КИНЕТИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

*Аннотация.* В работе методом инструментального индентирования определены значения твёрдости стали 15X2НМФА-А при комнатной и повышенных температурах. Показано снижение характеристик твёрдости стали при увеличении температуры и возможность реализации использованного метода при повышенных температурах на базе универсальной испытательной машины.

**G.B. Sviridov, A.Yu. Marchenkov, A.A. Pankina**

National Research university «МЭИ»

Moscow, Russia

## **DETERMINATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF 15KH2NMFA-A STEEL BY INSTRUMENTED INDENTATION AT HIGH TEMPERATURES**

*Abstract.* In this paper, the hardness values of 15Kh2NMFA-A steel at room temperature and high temperatures were determined using the instrumental indentation. The decrease of steel hardness characteristics with increasing temperature and the possibility of implementing said method at high temperatures on the universal testing machine are shown.

Сталь 15X2НМФА-А используется для изготовления корпусов водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) атомных электростанций. Реакторы такого типа установлены на 22 из 37 энергоблоков АЭС России. Металл корпуса ВВЭР, работающего в диапазоне температур от 200 до 320°C, требует периодического контроля механических свойств в процессе эксплуатации, и точное определение характеристик прочности является одним из важных этапов прогнозирования состояния металла корпуса реактора.

В настоящее время для контроля его механических свойств используются образцы-свидетели, которые испытывают растяжением с определением характеристик прочности и пластичности. Наряду с объективными преимуществами этой технологии, можно отметить и несколько её недостатков, основным из которых является возможное различие свойств металла образца-свидетеля и металла

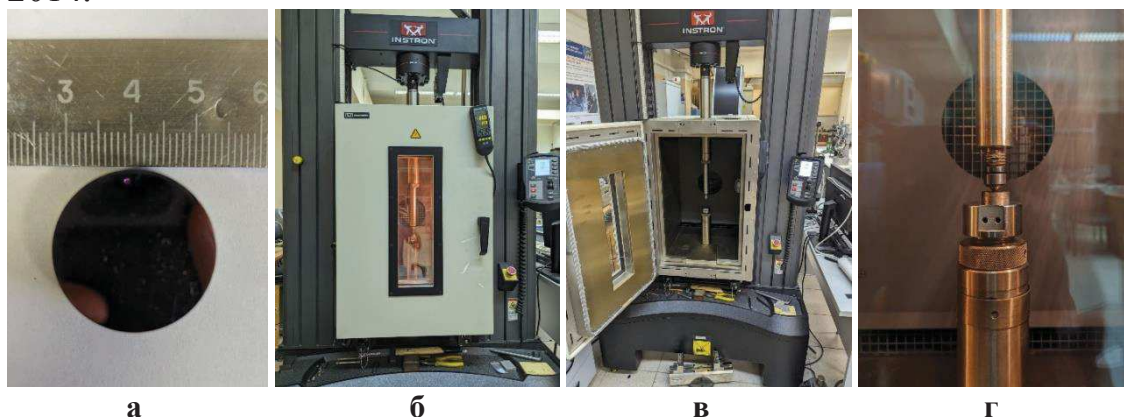
непосредственно корпуса реактора. В этой связи целесообразно думать о развитии способов контроля механических свойств, позволяющих определять механические свойства металла непосредственно на корпусе реактора и других элементах энергетического оборудования, работающих при повышенной температуре. Метод кинетического (инструментального) индентирования может стать одним из таких способов, внедрение которого позволит создать технологию неразрушающего контроля металла оборудования без изготовления и испытания образцов.

Для этого на первом этапе необходимо исследовать изменение диаграмм инструментального индентирования при повышении температуры и установить взаимосвязь механических характеристик, определяемых по диаграммам вдавливания, с механическими характеристиками, определяемыми испытаниями растяжением. При комнатной температуре такие связи в общем виде известны [1]. Однако, при повышении температуры испытания характер диаграмм вдавливания изменяется не только из-за изменения свойств испытуемого материала, но также за счёт изменения физико-механических характеристик индентора и изменения жёсткости узлов испытательного оборудования. В этой связи для того, чтобы использовать метод инструментального индентирования для оценки механических свойств металла при повышенной температуре, в настоящей работе проведено экспериментальное исследование по установлению характера изменения диаграмм вдавливания при различных высоких температурах.

Из прутка стали 15Х2НМФА-А Ø23 мм для проведения испытаний инструментальным индентированием были подготовлены образцы толщиной 10 мм, показанные на рис. 1а.

На универсальной испытательной машине Instron 5982 (рис. 1б-1г) было проведено инструментальное индентирование образцов с целью определения твёрдости при температурах 20, 100, 200 и 300°C. Испытания проводились в температурном кабинете. Перед испытанием вдавливанием производился нагрев до заданной температуры и последующая выдержка в течение 2-2,5 часов для температурной стабилизации испытательной системы. В установленный на столике образец вдавливался шаровой индентор диаметром 10 мм со скоростью 0,2 мм/мин до достижения максимальной нагрузки в 1000 кгс (9810 Н), затем следовала выдержка в нагруженном состоянии в течение 10 секунд и разгрузка с той же скоростью. В процессе нагружения были зарегистрированы диаграммы нагружения в координатах «нагрузка-

перемещение», которые затем обрабатывались согласно ГОСТ Р 56232-2014.

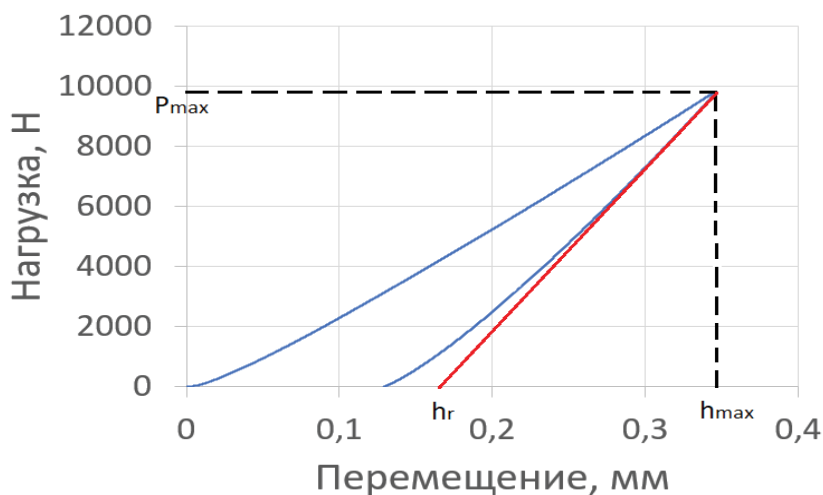


**Рис. 1 - Образец из реакторной стали 15X2НМФА-А для испытаний инструментальным индентированием (а) и экспериментальная установка для испытаний индентированием при повышенных температурах (б-г)**

Для определения твёрдости на диаграмме были определены характерные точки – максимальная нагрузка  $P_{max}$  и максимальное перемещение индентора  $h_{max}$ . Затем к верхней точке участка разгрузки была проведена касательная (рис. 2), и в месте пересечения касательной с осью абсцисс определена точка  $h_r$ . Далее были рассчитаны значения твёрдости при индентировании  $HB_{IT}$ :

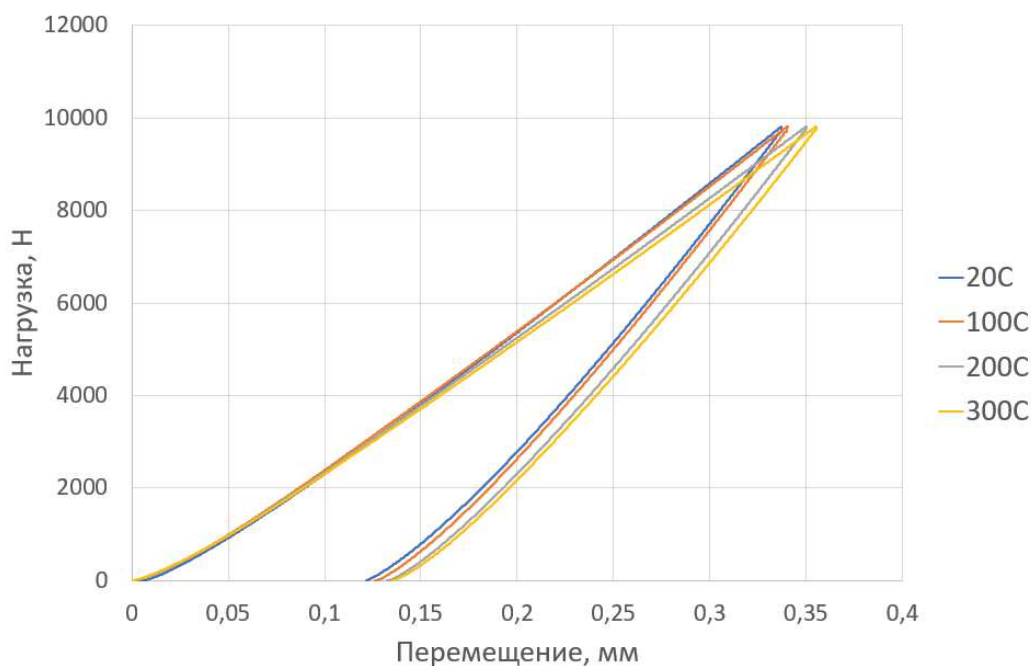
$$HB_{IT} = \frac{P_{max}}{\pi \cdot D \cdot h_c} \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр используемого индентора,  $h_c = h_{max} - 0.75(h_{max} - h_r)$ .



**Рис. 2 - Пример зарегистрированной диаграммы инструментального индентирования для стали 15X2НМФА-А**

На рис. 3 представлены характерные диаграммы вдавливания, зарегистрированные при различных температурах. Из диаграмм видно увеличение полной и остаточной глубины отпечатков при более высоких температурах, а также уменьшение угла наклона линии разгрузки у горизонтальной оси, что свидетельствует о плавном снижении модуля нормальной упругости при повышении температуры.

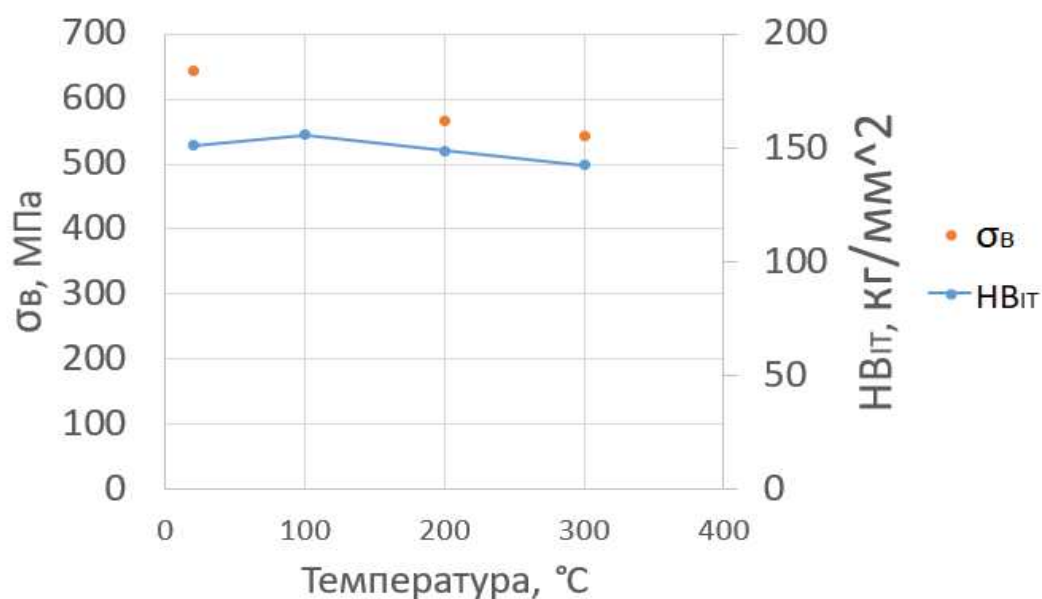


**Рис. 3- Диаграммы вдавливания для стали 15X2НМФА-А при температурах 20-300°C**

Результаты расчётов твёрдости при индентировании  $HV_{IT}$  представлены в таблице 1 и на рис. 4. Наблюдается небольшой рост твёрдости около значения температуры в 100°C по сравнению с комнатной температурой, после чего наблюдается снижение значений твёрдости при дальнейшем повышении температуры.

**Таблица 1- Результаты определения твёрдости  $HV_{IT}$  стали 15X2НМФА-А при повышенных температурах методом инструментального индентирования**

№	$T$	$P_{max}$	$h_{max}$	$h_r$	$h_c$	$HV_{IT}$	$\sigma_B$
-	°C	$H$	мм	мм	мм	кг/мм <sup>2</sup>	МПа
1	20	9810	0,345	0,165	0,210	151	644
2	100	9810	0,341	0,158	0,204	156	-
3	200	9810	0,351	0,167	0,213	149	567
4	300	9810	0,366	0,176	0,235	142	544



**Рис. 4 - График изменения твёрдости  $HB_{IT}$  и предела прочности  $\sigma_B$  стали 15X2НМФА-А в зависимости от температуры**

На рис. 4 и в таблице 1 приведены также данные испытаний растяжением образцов из этой же партии стали при различных температурах [2]. Указанные на графике значения твёрдости показывают тенденцию к снижению, аналогично значениям предела прочности при таких же значениях температуры. Испытания при более высоких температурах позволят спрогнозировать свойства данной стали при отклонении условий эксплуатации от нормальных, например, в случае тяжёлой аварии.

*Исследование выполнено в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10140, <https://rscf.ru/project/23-79-10140/>*

#### **Список использованных источников**

1. Матюнин В.М. Индентирование в диагностике механических свойств материалов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 288 с.
2. Локтионов В.Д., Соснин О.В., Любашевская И.В. Прочностные свойства и особенности деформационного поведения стали 15X2НМФА-А в температурном диапазоне 20-1000°C // Атомная энергия. 2005. Т. 99. №. 3. – С. 229-232.