

СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОДОРОДОПРОНИЦАЕМОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 08Х18Н10Т В ОБЛАСТИ УПРУГОЙ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

А. В. Вертей, И. Л. Малков, А. А. Юхимчук

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Теоретическая и экспериментальная часть

Целью данного исследования является изучения влияния давления водорода на кинетические параметры водородопроницаемости (ВП) нержавеющей стали 08Х18Н10Т.

Методика определения кинетических параметров ВП конструкционных материалов (КМ) основана

на анализе изменения теплопроводности газа-носителя, омывающего выходную поверхность исследуемого образца, вследствие растворения в газе-носителе продифундировавшего через образец водорода. Устройство установки [1] позволяет получать параметры ВП сразу для трех образцов, принципиальная схема приведена на рис. 1.

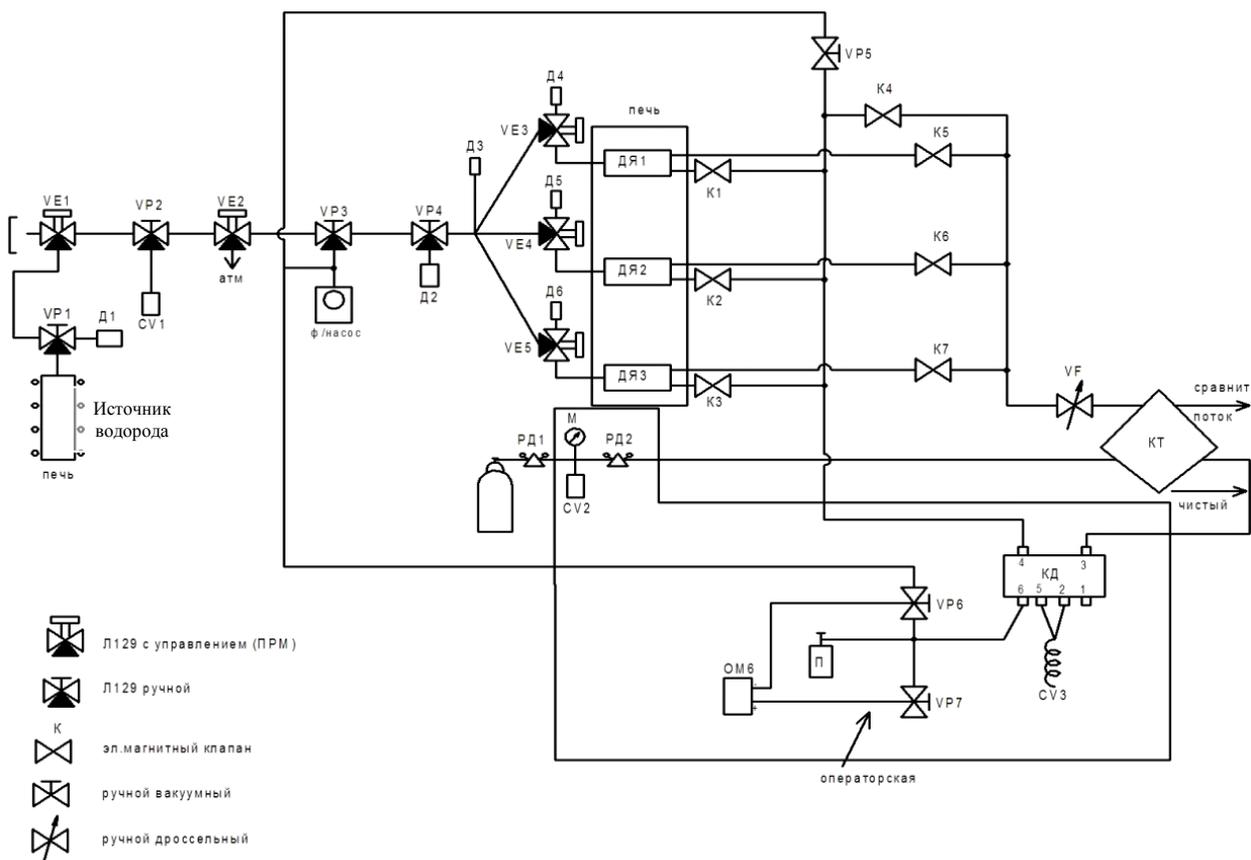


Рис. 1. Принципиальная схема установки для исследований ВП КМ: ДЯ – диффузионная ячейка; К1–К7 – электромагнитный клапан; VF – ручной дроссельный вентиль; КТ – катарометр; КД – кран-дозатор; CV3 – мерный объем; VP1–VP7 – ручной вентиль; VE1–VE5 – вентиль с электромеханическим приводом; РД1, РД2 – редуктор; CV1, CV2 – буферная емкость; Д1, Д3–Д6 – датчики типа AP-17; Д2 – вакуумный датчик; ОМ6 – оптический манометр; П – пробоотборник; ф/насос – форвакуумный безмасляный насос GVSP-30

При проведении исследований измерялись и определялись следующие параметры водородопроницаемости:

- 1) коэффициент ВП P_H ;
- 2) коэффициент диффузии D_H ;
- 3) растворимость S_H .

Исследования ВП проводились при давлениях водорода от 6 до 72 МПа и температуре 300 °С в интегральном режиме измерений. Данные условия исследований (давления и температура) были выбраны, исходя из основных характеристик материала и геометрии образца (рис. 2).

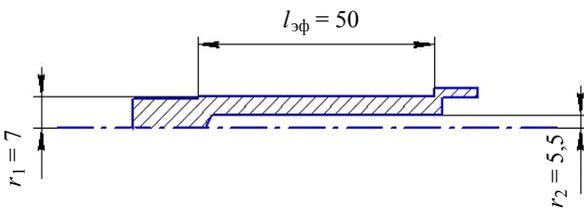


Рис. 2. Основные геометрические параметры образца

Основные геометрические размеры образца:

$l_{эф}$ – эффективная длина образца;

r_1, r_2 – наружный и внутренний радиус образца;

c – средняя длина окружности рабочей цилиндрической части $\pi(r_1 + r_2)$;

$S_{пов}$ – средняя рабочая площадь поверхности образца: $S_{пов} = cl_{эф}$.

Основные параметры ВП рассчитывались следующим образом.

Величина потока, Π_H , определялась по формуле:

$$\Pi_H = Q_H / \Delta t,$$

где Q_H – количество водорода протиффундировавшего сквозь образец; Δt – время накопления водорода на выходной стороне ячейки.

Коэффициент водородопроницаемости цилиндрического образца, P_H , определялся по формуле:

$$P_H = \Pi_H \frac{(r_1 - r_2)}{(r_1 + r_2) l_{эф}},$$

где Π_H – поток водорода, см³/с; геометрические размеры образца ($l_{эф}, r_1, r_2$) в см.

Коэффициент диффузии определялся по формуле:

$$D_H = \frac{r_2^2 - r_1^2 + [r_1^2 + r_2^2] \ln \frac{r_1}{r_2}}{4t_k \ln \frac{r_1}{r_2}} \cdot \frac{S_1 + S_2}{S_1},$$

где t_k, S_1, S_2 определяются из графика зависимости потока от времени $\Pi_H(t)$ рис. 3.

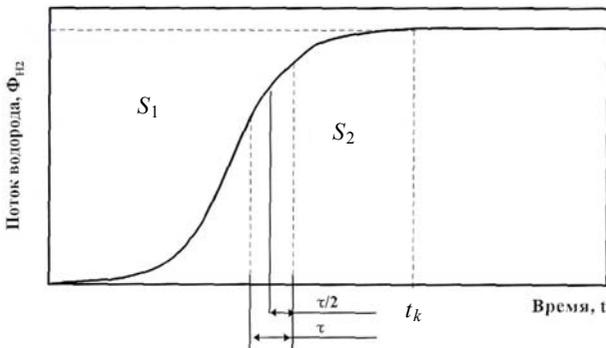


Рис. 3. Теоретическая зависимость потока от времени

Выбирая произвольную точку времени, превышающую время стабилизации потока, график разбивается на две части S_1 и S_2 , площади которых вычисляются для определения коэффициента диффузии водорода.

Растворимость водорода определялась косвенным путем по формуле:

$$S_H = \frac{P_H}{D_H}.$$

Напряженное состояние в стенке трубчатого образца, нагруженного наружным давлением P , определялось по формулам [2]:

$$\sigma_r = -\frac{P \cdot r_1^2}{r_1^2 - r_2^2} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right), \quad \sigma_\theta = -\frac{P \cdot r_1^2}{r_1^2 - r_2^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right),$$

$$\sigma_z = -\frac{P \cdot r_1^2}{r_1^2 - r_2^2},$$

где $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ – радиальное, кольцевое и осевое напряжения.

Анализ напряженного состояния показывает, что стенка трубчатого образца находится в условиях всестороннего сжатия (рис. 4).

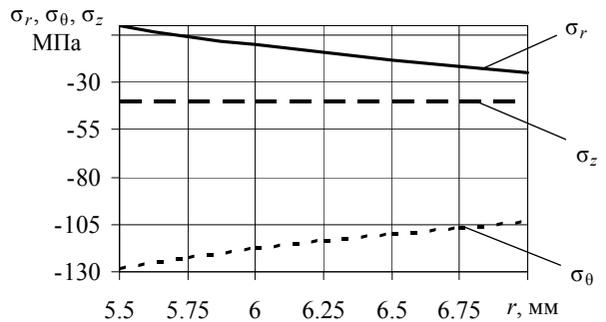


Рис. 4. Распределение напряжений по стенке образца при давлении $P = 24,5$ МПа

Предельное состояние в стенке образца, то есть начало текучести материала, оценивалось по третьей теории прочности (условие Треска-Сен-Венана):

$$\sigma_{эКВ}^{III} = \sigma_r - \sigma_\theta = -\frac{2 \cdot P \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{(r_1^2 - r_2^2) r^2}.$$

Максимальные эквивалентные напряжения $\sigma_{эКВ}^{III}$ реализуются на внутренней поверхности образца при $r = r_2$. Для стали 08Х18Н10Т условный предел текучести при температуре 300 °С равен $\sigma_{0,2} \approx 160$ МПа [3] и предельное состояние в стенке образца $\sigma_{эКВ}^{III} = \sigma_{0,2}$ достигается при наружном давлении $P_{пр} \approx 30,6$ МПа (рис. 5). Напряженное состояние в стенке образца при $P = 24,5$ МПа (упругое состояние) и при давлениях $P = 36,1; 47,6; 55,5$ МПа,

вызывающих появление пластических деформаций, показано на рис. 6. При давлении $P = 36,1$ МПа область пластических деформаций составляет $\approx 0,3$ от толщины стенки образца (темно-серая область, рис. 6 в), при больших давлениях пластические деформации распространяются на всю толщину стенки образца (рис. 6 г). Таким образом, переход материала в стенке образца из упругого состояния в упруго-пластическое наступает в интервале давлений $24,5...36,1$ МПа. На всю толщину стенки образца пластическая область распространяется при давлении $P \approx 44$ МПа, то есть в интервале давлений $36,1...47,6$ МПа.

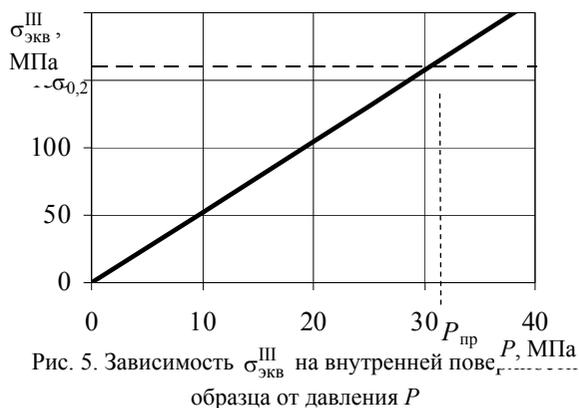


Рис. 5. Зависимость $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{III}}$ на внутренней поверхности образца от давления P

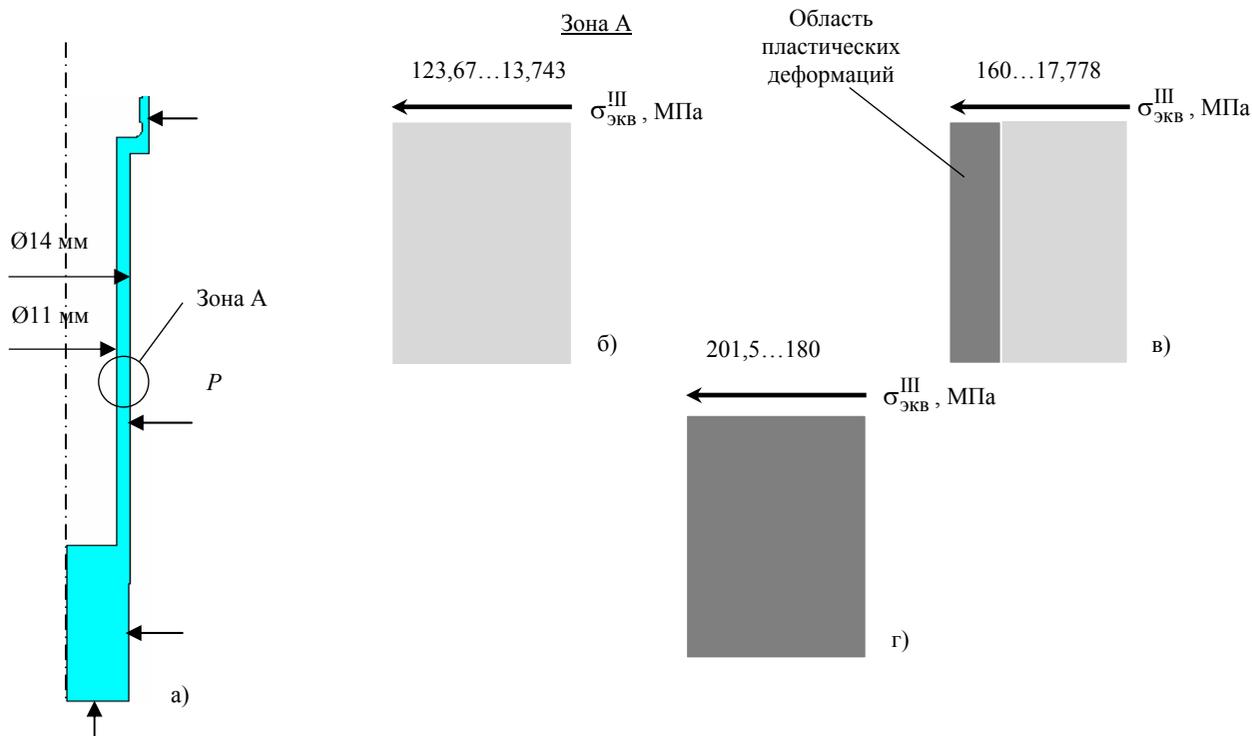


Рис. 6. Напряженное состояние в стенке образца при нагружении наружным давлением P : а) расчетная область; б) $P = 24,5$ МПа; в) $P = 36,1$ МПа; г) $P = 47,6$ МПа;

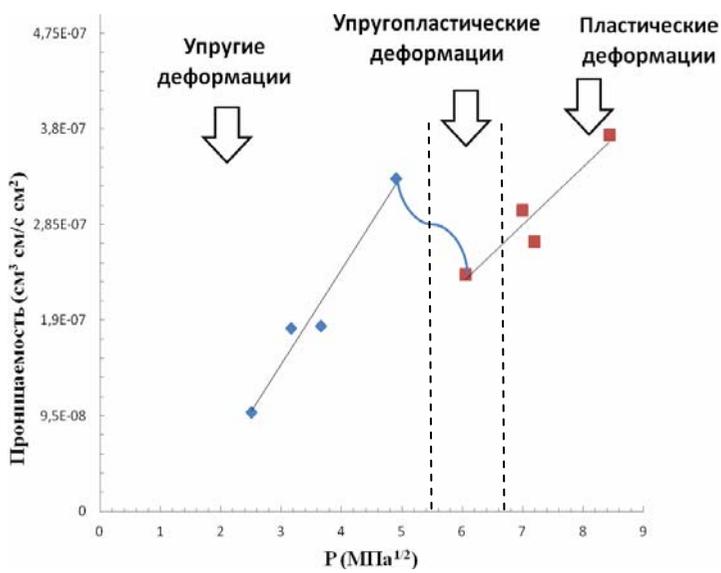
Результаты и их обсуждение

Результаты проведенных исследований ВП приведены на рис. 7. Как видно, зависимость проницаемости и растворимости от квадратного корня из давления в упругой области является практически линейной (рис. 7 а, в), т. е. отклонений от закона Сивертса не наблюдается. Исследования, описанные в работе [4], указывают на малое влияние давления водорода на коэффициент диффузии, чем и объясняется незначительный наклон прямой (рис. 7 б).

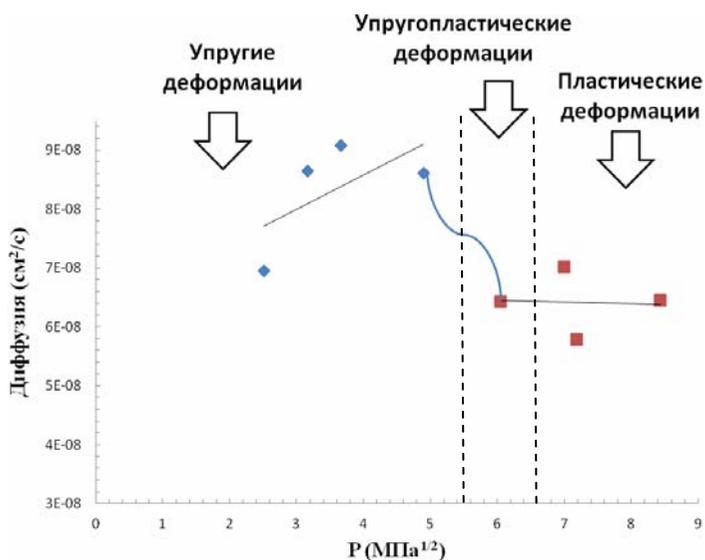
При повышении давления водорода выше давления, вызывающего появления зоны пластических деформаций, то есть $\approx 30,6$ МПа, наблюдается скачкообразное уменьшение коэффициентов проницаемости и диффузии.

Заключение

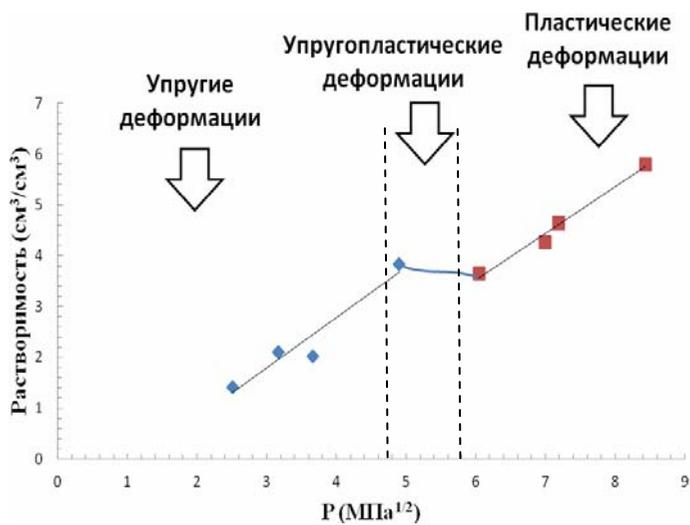
- Зависимость основных кинетических параметров ВП (проницаемость и растворимость) стали 08X18N10T от квадратного корня из давления является линейной в области упругих деформаций.
- При переходе от упругих к пластическим деформациям наблюдается изменение (падение) проницаемости, растворимости и диффузии водорода.
- Для определения характера данной зависимости и фактических параметров в областях упруго-пластических и пластических деформаций требуется проведение дополнительных исследований.



а



б



в

Рис. 7. Основные зависимости кинетических параметров ВП от квадратного корня из давления

Литература

1. Вертей А. В., Фильчагин С. В., Юхимчук А. А. Установка для изучения водородопроницаемости конструкционных материалов // ИИISM'08 Четвертая международная школа молодых ученых и специалистов: Тезисы докладов. Нижний Новгород, 2008. С. 194–196.
2. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова Думка, 1975.
3. Масленков С. Б., Масленкова Е. А. Стали и сплавы для высоких температур: Справочник. Кн. 1. М.: Metallurgia, 1991.
4. Арчаков Ю. И. Водородная коррозия стали. М.: Metallurgia, 1985.