

В. И. Миронов,*доц., канд. техн. наук**Институт машиноведения УрО РАН,**Уральский федеральный университет,**Екатеринбург***В. В. Яковлев,***аспирант**Уральский федеральный университет,**Екатеринбург*

КРИТЕРИИ ВОДОРОДНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

На примере результатов испытания образцов стали Ст20 на растяжение при разной концентрации водорода в металле приводится схема водородной деградации прочности материала. Схема дает основание для выбора подходящего инварианта напряженного состояния элемента конструкции при формулировке критериев остаточной прочности в зависимости от текущего состояния материала. Предлагается по аналогии с теорией усталости обобщить правило пересечения кинетической кривой прочности материала с уровнем действующих напряжений в элементе конструкции на процесс перехода материала в хрупкое состояние при наводороживании. На основании сделанного обобщения формулируется критерий длительной водородной прочности.

Ключевые слова: водород, теплопроводность, диффузия, концентрация, свойства материала, критерий разрушения, схема.

CRITERIA HYDROGEN STRENGTH METAL CONSTRUCTION

On the example of the results of tensile testing of steel ST20 samples at different concentrations of hydrogen in the metal, a scheme of hydrogen degradation of the material strength is given. The scheme provides a basis for selecting a suitable invariant of the stress state of the structural element in the formulation of the residual strength criteria, depending on the current state of the material. It is proposed by analogy with the theory of fatigue to generalize the rule of crossing the kinetic curve of strength of the material with the level of acting stresses in the structural element on the process of transition of the material to a brittle state during hydrogenation. On the basis of the generalization the criterion of long-term hydrogen strength is formulated.

Keywords: hydrogen, heat conduction, diffusion, concentration, material properties, criteria strength, schema.

Достаточно подробный анализ современного состояния проблемы воздействия водорода на металлы содержится в работах [1–4] и др. Несмотря на то, что публикаций по данной проблематике достаточно много и накоплен огромный теоретический и экспериментальный материал, опасность непредсказуемого разрушения металлических конструкций под влиянием водорода существует. Например, анализ аварийных разрушений в нефтегазовой промышленности показывает, что наряду с действием многих факторов (коррозия, пульсация температуры и давления газа), одним из весомых является наводороживание трубопроводов и оборудования.

Многочисленные гипотезы о влиянии водорода на свойства металлов не привели к созданию приемлемой для практических расчетов физически строгой теории водородной хрупкости материалов и конструкций. По этой причине разработка

феноменологических моделей деструктивных процессов охрупчивания металлов и методов прогнозирования остаточной прочности и ресурса элементов конструкций при наводороживании остается актуальной проблемой. Исследование деградационных процессов в металле эксплуатируемой конструкции является определяющим звеном в решении проблемы повышения надежности машин и оборудования.

Экспериментальное исследование изменений свойств материала под действием различных внешних факторов традиционно для механики материалов. Так, в известной схеме Иоффе рассматривалось изменение пределов прочности и текучести металла с понижением температуры испытаний образцов (рис. 1).

Полагалось, что при неизменном пределе прочности снижение температуры испытаний приводит к росту предела текучести сталей, а пересече-

ние соответствующих зависимостей определяет температуру вязко-хрупкого перехода. Дальнейшее понижение температуры приводит к повышению обоих показателей и разрушению металла без пластических деформаций.

В ряде ранних работ по влиянию водорода на механические свойства конструкционных сталей и сплавов отмечается снижение предела прочности и показателей пластичности, повышение предела текучести, несущественное снижение модуля упругости с ростом концентрации водорода в металле. Рассматривается схема, аналогичная схеме Иоффе, для оценки влияния концентрации водорода на прочность стали. Полагается, что влияние водорода на прочность металла не зависит от способа достижения заданного уровня концентрации. Водород в испытуемом объеме металла распределен равномерно.

На рис. 2 приведены экспериментальные данные о снижении пределов прочности и пластичности стали 20 с ростом концентрации водорода в образце [5].

Представленные концентрационно-механические кинетические кривые водородной прочности $\sigma_B(c)$ и текучести $\sigma_T(c)$ построены при постоянной температуре $T = \text{const}$. Пересечение кривых определяет концентрацию c_{xp} перехода изначально пластичного материала в хрупкое состояние. При однократном нагружении разрушению наводороженного до концентрации c_1 образца предшествует пластическая деформация, а при c_2 разрушение будет хрупким. Ограничимся для определенности случаем низкотемпературного наводороживания $T \leq 200$ °С. Тогда следует ожидать, что при смене температуры испытаний схема качественно не изменится, но изменится положение кинетических кривых на плоскости параметров. Смена температуры во время испытаний ассоциируется с переходом на новую кинетическую кривую поверхности $\sigma_B(T, c)$.

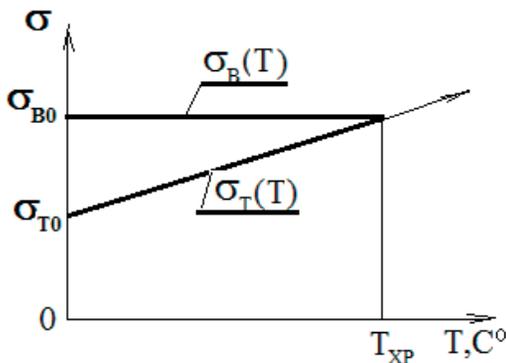


Рис. 1. Схема Иоффе для низких температур

Критерии прочности деформируемых тел традиционно строятся с использованием инвариантов напряженного состояния. Для пластичных материалов чаще других используют интенсивность касательных напряжений, а для хрупких материалов интенсивность нормальных напряжений. При одноосном напряженном состоянии интенсивность касательных напряжений определяется выражением $S_B = \sigma_B / \sqrt{3}$, а интенсивность нормальных напряжений σ_{iB} равна самому пределу прочности. Так что зависимость $\sigma_B(c)$ может быть просто перестроена в новые координаты в зависимости от решаемой задачи.

В случае перегрузки наводороженной конструкции критерием однократного разрушения при концентрации c_1 будет выполнение условия

$$S_D \geq S_B(c_1),$$

где S_D — максимальная интенсивность касательных напряжений в элементе конструкции при аварийном повышении нагрузок в эксплуатации.

Критерием однократного разрушения при концентрации c_2 будет выполнение условия

$$\sigma_{iD} \geq \sigma_B(c_2),$$

где σ_{iD} — максимальная интенсивность нормальных напряжений в элементе конструкции при аварийном повышении нагрузок.

Критерием хрупкого разрушения в нормальном режиме работы будет пересечение кинетической кривой $\sigma_B(c)$ с уровнем максимальной интенсивности нормальных напряжений в элементе конструкции

$$\sigma_B(c) = \sigma_{iD}.$$

Правило пересечения, использованное при формулировке данного критерия длительной водородной прочности, в теории деградиционных процессов может играть, по-видимому, роль некоего принципа. Обобщение схемы на другие деградиционные процессы проводится заменой концентрации на температуру, число циклов, время и другие параметры. Определение напряженного состояния наводороженного элемента конструкции для нахождения его инвариантов представляет самостоятельную и достаточно сложную физико-механическую задачу. Например, в работе [4] решалась термодиффузионная задача наводороживания стальной оболочечной конструкции путем переноса уравнений теплопроводности на процесс диффузии водорода. Находилось время до установления постоянной концентрации водорода по толщине оболочки. По схеме на рис. 2 может

быть установлено соответствующее значение предела прочности и предела текучести материала наводороженной оболочки. Далее решается механическая задача по нахождению предельного состояния оболочечной конструкции с новыми свойствами материала по одному из приведенных выше критериев прочности.

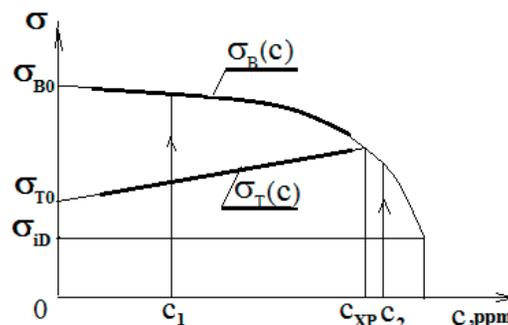


Рис. 2. Схема водородной прочности Ст20

Список литературы.

1. Овчинников И. И. Влияние водородосодержащей среды при высоких температурах и давлениях на поведение металлов и конструкций из них / И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников // Наукоедение : [интернет-журнал]. — 2012. — № 4.
2. Ребяков Ю. Н. Деформирование и разрушение материалов и конструкций в условиях диффузии / Ю. Н. Ребяков, А. О. Чернявский, О. Ф. Чернявский // Вестн. ЮУрГУ. — № 10. — 2010. — С. 4–16.
3. Нечаев Ю. С. Актуальные проблемы старения, водородного охрупчивания и стресс — коррозионного поражения сталей и эффективные пути их решения / Ю. С. Нечаев // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 2007. — № 11(55). — P. 108–117.
4. Емельянов И. Г. Термодиффузионная задача наводороживания стальной оболочечной конструкции / И. Г. Емельянов, В. И. Миронов // Вестн. ПНИПУ. Механика. 2018. — № 4. — С. 27–35. — DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.03
5. Галактионова Н. А. Водород в металлах / Н. А. Галактионова. — Москва : ГНТИ лит. по черной и цветной металлургии, 1959. — 256 с.