

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ВОДОРОДА НА ИСТИННУЮ ДИАГРАММУ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ХРОМОНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ХН40МДТЮ

*И. Л. Малков, И. Е. Бойцов, И. П. Максимкин, Н. Ю. Туманова,
Е. В. Шевнин, А. А. Юхимчук*

РФЯЦ – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, г. Саров, Россия

В работе приведены результаты испытаний на растяжение цилиндрических образцов из хромоникелевого сплава ХН40МДТЮ в диапазоне температур 20–600 °С в среде водорода при давлении 80 МПа и на воздухе, описана методика построения истинных диаграмм деформирования на участке равномерного деформирования (то есть, до момента образования шейки при максимальной нагрузке на образце), приведены аналитические описания истинных диаграмм деформирования.

Показано, что водород оказывает влияние на величину равномерной деформации ($\bar{\varepsilon}_{iB}$) и это влияние зависит от температуры испытаний ($T_{исп}$): максимальное относительное снижение величины равномерной деформации наблюдается при $T_{исп} = 300$ °С и составляет ≈ 50 %, что свидетельствует о заметном охрупчивании материала. В исследованном диапазоне температур (20–600 °С) при деформациях $\leq \bar{\varepsilon}_{iB}$ наблюдается удовлетворительное совпадение истинных диаграмм деформирования сплава ХН40МДТЮ в водороде и на воздухе.

Введение

Интерес к проблеме влияния водорода на механические свойства конструкционных материалов (КМ) в последние десятилетия связан с возрастающими требованиями к надежности эксплуатации оборудования, работающего с водородосодержащими средами (химические отрасли, энергетика и т. д.). Важным аспектом в решении этой проблемы является исследование процесса деформирования КМ при активном воздействии водородосодержащей среды. Имеется большое количество данных о влиянии водорода на стандартные характеристики механических свойств КМ (σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ) [1–4]. В то же время для решения задач о предельном состоянии элементов конструкций необходимо иметь максимально полное описание процессов деформирования и разрушения КМ, и диаграмма деформирования, устанавливающая связь между нагрузкой (напряжением) и деформацией, «остаётся единственно доступным источником знаний об индивидуальных механических свойствах конкретного материала» [5].

Результатов исследований влияния водорода на диаграммы деформирования КМ сравнительно немного [3, 4, 6–8] и они, как правило, противоречивы, так как воздействие водорода на процесс деформирования зависит от многих факторов, таких как химический состав и структура КМ, концентрация

и распределение водорода в КМ, условия испытаний и т. д. Например, в работе [6] показано, что концентрация дейтерия $4,7 \text{ см}^3 \cdot \text{D}_2/\text{см}^3 \cdot \text{Me}$ в нержавеющей стали 304L слабо влияет на диаграмму деформирования при температуре $\sim 220 \text{ K}$ и скорости деформации $0,0085 \text{ мм/с}$. В то же время в титановом сплаве ВТ6 водород оказал заметное влияние на диаграмму деформирования [7]. Авторы работы [3] отмечают, что при электролитическом наводороживании стали 12Х18Н10Т существенно изменяется пластическое деформирование стали на начальной стадии нагружения, при дальнейшем нагружении влияние водорода снижается, а в работе [4] приводятся прямо противоположные данные – водород не влияет на начальную область пластического деформирования стали, а заметное водородное охрупчивание имеет место только после достижения максимальной нагрузки. В связи с этим для теории и практики водородного охрупчивания представляют определенный интерес новые экспериментальные результаты по исследованию влияния водорода на диаграммы деформирования промышленных конструкционных материалов.

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния внешнего водорода высокого давления на диаграмму деформирования жаропрочного дисперсионно-твердеющего сплава аустенитного класса ХН40МДТЮ.

1. Диаграммы деформирования

Наиболее распространенным видом механических испытаний КМ является испытание образцов на растяжение. Обычно при испытании на растяжение записывается зависимость осевой растягивающей нагрузки P от абсолютного удлинения образца Δl (машинная диаграмма деформирования). Типичный вид машинной диаграммы (МДД) деформирования приведен на рис. 1. С помощью МДД определяют такие характеристики механических свойств КМ, как предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$, предел упругости $\sigma_{\text{уп}}$, условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$. На МДД можно выделить три участка: участок упругой деформации I, участок равномерной упруго-пластической деформации II и участок локализации деформации III. На участке I деформация КМ является упругой и наблюдается линейная зависимость между нагрузкой и абсолютным удлинением: $P = k \cdot \Delta l$ (закон Гука).

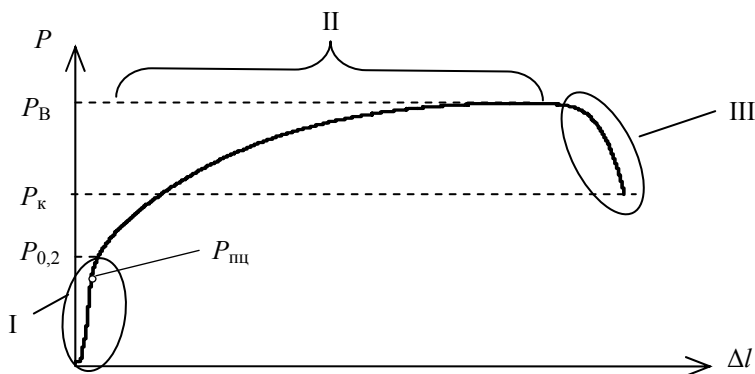


Рис. 1. Машинная диаграмма деформирования

В инженерной практике за границу участка I обычно принимают нагрузку $P_{0,2}$, при которой остаточная (пластическая) деформация образца равна 0,2 %. Деформация образца на участке II является упругопластической, по всей длине образца деформация поперечного сечения одинаковая, а удлинение – равномерное. Нагрузка монотонно увеличивается от $P_{0,2}$ до максимальной нагрузки P_B , но зависимость P от Δl уже не является линейной. Для пластичных КМ при P_B величина остаточных деформаций составляет от 10 до 15 %. За максимумом P_B МДД имеет нисходящую ветвь (участок III). Деформация образца локализуется, что ведет к образованию местного сужения в виде «шейки» и к падению нагрузки P . Участок III заканчивается разрушением образца при нагрузке P_k .

Так как нагрузка и абсолютное удлинение зависят от формы и размеров образцов и непосредственное использование МДД для расчетов на прочность и исследование поведения КМ невозможно, то результаты экспериментальных исследований механических свойств КМ обычно представляют в виде графика зависимости условных напряжений σ от условных деформаций ε, ψ . При этом нагрузку на образце относят к первоначальной площади поперечного сечения F_0 , удлинение образца $\Delta l_0 = l - l_0kl_0$, уменьшение площади поперечного сечения $\Delta F = F_0 - F_kF_0$

$$\sigma = \frac{P}{F_0}; \quad \varepsilon = \frac{\Delta l_0}{l_0}; \quad \psi = \frac{\Delta F}{F_0}. \quad (1)$$

В выражениях (1) не учитывается изменение площади поперечного сечения образца и его неравномерное деформирование по длине. График зависимости условных напряжений от условных деформаций $\sigma = f(\varepsilon)$ называется условной диаграммой деформирования (УДД) (рис. 2, кривая а).

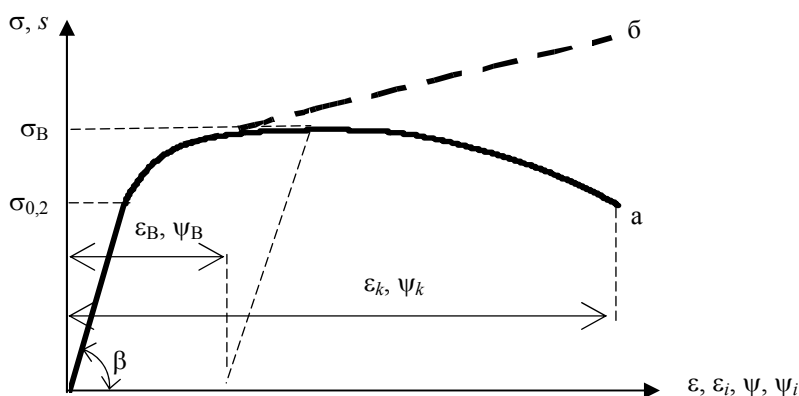


Рис. 2. Условная (а) и истинная (б) диаграммы деформирования

УДД в определенных пределах не зависит от геометрии и размеров образцов и позволяет помимо стандартных характеристик механических свойств КМ ($\sigma_{пл}$,

$\sigma_{уп}$, $\sigma_{0,2}$, σ_B) определять также модуль упругости ($E = \text{tg}\beta$), наибольшую равномерную деформацию (ε_B , ψ_B), деформацию образца при разрушении (ε_k , ψ_k). Важным свойством УДД является то, что она адекватно описывает поведение пластичных КМ в области малых упруго-пластических деформаций и хрупких КМ вплоть до разрушения. Это обуславливает ее широкое использование при расчетах напряженно-деформированного состояния (НДС) и исследованиях механических свойств КМ.

Основной недостаток УДД связан с допущением о неизменности поперечного сечения образца и равномерности деформации. В действительности площадь поперечного сечения непрерывно уменьшается, а при некоторой величине деформации нарушается равномерное деформирование образца (образование шейки). Поэтому для решения задач, характеризующихся большими деформациями (то есть при деформациях, превышающих несколько процентов), необходимо располагать истинной диаграммой деформирования (ИДД). Для построения ИДД ($\sigma_i = f(\varepsilon_i)$) определяют истинные напряжения и деформации

$$\sigma_i = \frac{P}{F}; \quad \varepsilon_i = \ln \frac{l}{l_0} \quad (\text{при равномерной деформации}); \quad \psi_i = \ln \frac{F}{F_0}. \quad (2)$$

Типичный вид ИДД приведен на рис. 2 (кривая б). Как следует из формул (1) и (2) при деформациях до $\approx 3\%$ ИДД и УДД практически совпадают. Расхождение между ИДД и УДД существенно проявляется к моменту, когда $\sigma \approx \sigma_B$. После достижения максимальной нагрузки условные напряжения уменьшаются, в то время как истинные напряжения продолжают увеличиваться. Понижение нагрузки и, соответственно, условных напряжений, обусловлено способом испытания образцов (растяжение), при котором происходит образование шейки. При других видах испытаний (например, кручение, изгиб) этого явления не наблюдается. Таким образом, истинные напряжения имеют больший физический смысл, чем условные.

2. Методика

Испытаниям на растяжение подвергались стандартные цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 3 мм (тип IV, № 9, ГОСТ 1497-84) из жаропрочного дисперсионно-твердеющего сплава аустенитного класса ХН40МДТЮ (химический состав, % по массе: C $\leq 0,04$; Si $\leq 0,5$; Mn $\leq 0,80$; Cr 14,0–17,0; Ni 39,0–42,0; Ti 2,5–3,2; Al 0,7–1,2; Mo 4,4–6,0; Cu 2,7–3,3 [9]). Сплав ХН40МДТЮ был термообработан по следующему режиму: старение при 600–630 °С в течение 6–8 ч, охлаждение на воздухе.

Цилиндрические образцы испытывались на растяжение на воздухе и в среде водорода высокого давления (80 МПа) в диапазоне температур 20–600 °С. Испытания образцов на воздухе проводились на модернизированной установке на базе разрывной машины UTS 100K [10], а в среде водорода – на установке для испытания на растяжение образцов в среде водорода высокого давления [11].

Сплав ХН40МДТЮ при температуре 20 °С имеет следующие исходные механические свойства: $\sigma_B = 1346$ МПа, $\sigma_{0,2} = 970$ МПа, $\delta = 18,9$ %, $\psi = 43,3$ %.

В процессе испытаний фиксировалась зависимость осевой растягивающей нагрузки P от деформации Δl системы «образец-машина» и определялись температурные зависимости механических свойств (σ_B , $\sigma_{0,2}$, относительного удлинения после разрыва – δ , относительного сужения после разрыва – ψ) сплава ХН40МДТЮ. Водородное охрупчивание сплава ХН40МДТЮ оценивалось величиной $\beta = X_H/X_0$, где X_H и X_0 – изучаемая характеристика механических свойств при воздействии водорода и в исходном состоянии соответственно. Перестройка машинной диаграммы деформирования в условную и истинную диаграммы деформирования в области равномерного деформирования образцов, то есть до напряжений σ_{iB} и максимальной равномерной деформации ε_{iB} , соответствующих максимальной нагрузке на образце P_B , проводилась по методике, приведенной в работе [12].

Для аналитического определения НДС при расчетах за пределами упругости и определения несущей способности элементов конструкций, например методом конечных элементов [13], необходимо иметь аналитическое описание диаграммы деформирования. Вопросам математической аппроксимации диаграмм деформирования посвящено большое число работ [5, 14–17]. В настоящей работе, как наиболее простые и удобные в инженерных расчетах на прочность, были использованы линейная [15] и степенная [17] аппроксимации диаграммы деформирования сплава ХН40МДТЮ на участке равномерного деформирования. Диаграмму деформирования удобно записывать в относительных координатах $\bar{\sigma}_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{0,2}}$ и $\bar{\varepsilon}_i = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{0,2}}$, где $\varepsilon_{0,2}$ – деформация, соответствующая $\sigma_{0,2}$.

Линейная аппроксимация диаграммы деформирования записывается в виде кусочно-линейной функции [15]:

$$\bar{\sigma}_i = \begin{cases} \bar{\varepsilon}_i, & \text{если } \bar{\varepsilon}_i \leq 1, \\ \bar{E}_T \bar{\varepsilon}_i, & \text{если } \bar{\varepsilon}_i > 1. \end{cases} \quad (3)$$

где \bar{E}_T – относительный модуль упрочнения ($\bar{E}_T = E_T/E$; E , E_T – модули Юнга и упрочнения, соответственно).

Аппроксимация диаграммы деформирования степенной функцией по сравнению с линейной позволяет более точно описать нелинейную часть ИДД [17]. В этом случае при $\bar{\varepsilon}_i > 1$ функция $\bar{\sigma}_i = f(\bar{\varepsilon}_i)$ имеет вид:

$$\bar{\sigma}_i = A \bar{\varepsilon}_i^n, \quad (4)$$

где A – константа, n – коэффициент деформационного упрочнения, зависящий от химического состава и структурного состояния КМ.

Результаты исследований и их обсуждение

Влияние водорода при давлении 80 МПа на стандартные характеристики механических свойств сплава ХН40МДТЮ в диапазоне температур 20–600 °С показано на рис. 3.

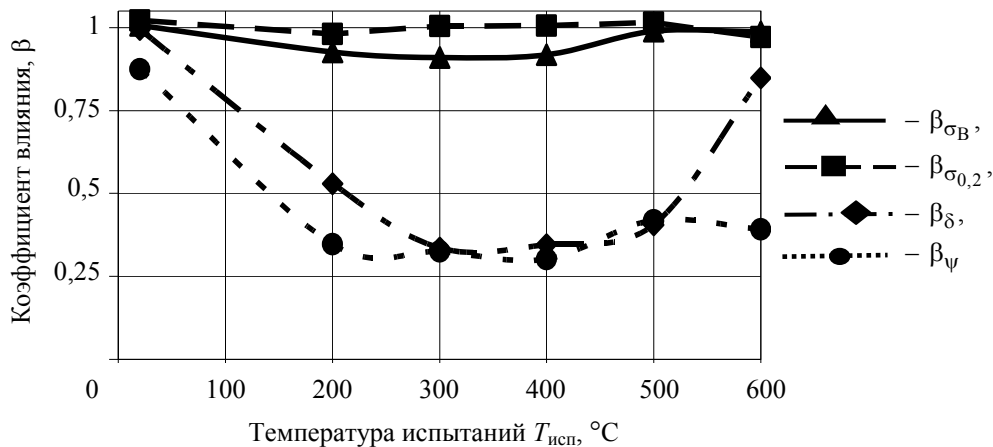


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициентов влияния водорода на характеристики механических свойств сплава ХН40МДТЮ

Поведение сплава ХН40МДТЮ в среде водорода при растяжении характеризуется умеренным уменьшением предела прочности σ_B в диапазоне температур 200–500 °С, при этом влияние водорода на условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ практически отсутствует. Характеристики пластичности существенно снижаются при температурах больше ≈ 200 °С. Таким образом сплав ХН40МДТЮ по сравнению с большинством сталей имеет расширенный температурный диапазон водородного охрупчивания, сдвинутый в область более высоких температур. Аналогичный характер водородного охрупчивания дисперсионно-твердеющих железо-никелевых сплавов отмечается и в работе [18].

Типичный вид диаграмм деформирования сплава ХН40МДТЮ в водороде и на воздухе приведены на рис. 4. На рис. 4, а — температура испытаний равна 20 °С, видно, что диаграммы деформирования на воздухе и в водороде практически совпадают, равны и равномерные деформации ($\bar{\epsilon}_{IB} \approx 20$), а, следовательно, среда испытаний на поведение сплава ХН40МДТЮ при нагружении не повлияла. Иная картина (рис. 4, б) наблюдается при испытании образцов при 300 °С — диаграммы деформирования на воздухе и в водороде совпадают до достижения максимальной нагрузки на образце, испытывавшемся в водороде ($\bar{\sigma}_{IB} \approx 1,35$). Далее при нагружении образца в водороде происходит локализации пластической деформации, то есть образуется шейка, а образец на воздухе продолжает деформироваться до $\bar{\sigma}_{IB} \approx 1,54$. При этом равномерная деформации образцов, нагружавшихся на воздухе, почти в два раза больше равномерной деформации образцов, испытанных в водороде.

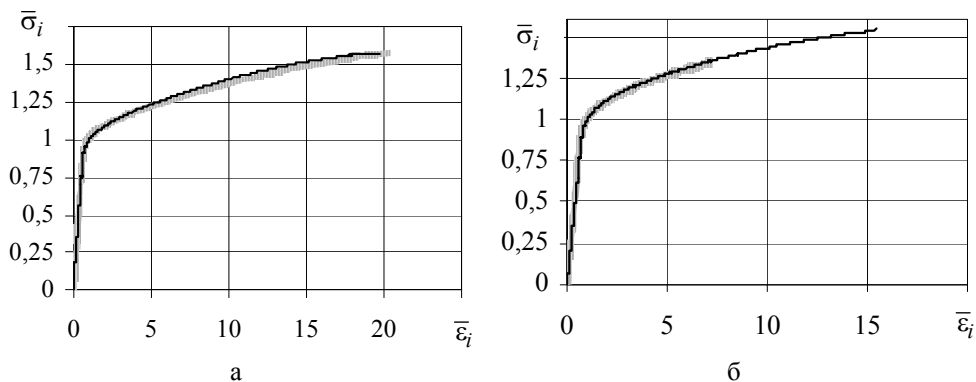


Рис. 4. Типичные диаграммы деформирования сплава ХН40МДТЮ:
 а – температура 20 °С; б – температура 300 °С;
 ———— – воздух; - - - - - водород

Температурная зависимость $\bar{\sigma}_{iB}$ и $\bar{\varepsilon}_{iB}$, характеризующих максимальную равномерную деформацию сплава ХН40МДТЮ при испытании на воздухе и в водороде, приведена на рис. 5.

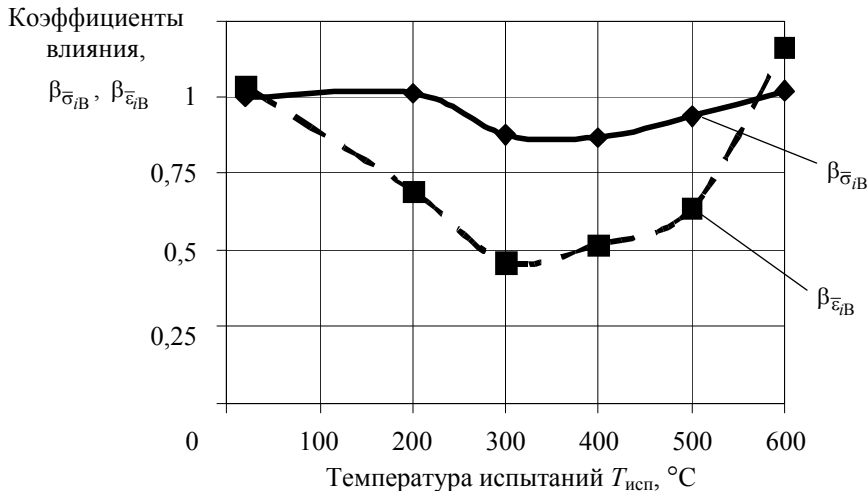


Рис. 5. Температурная зависимость коэффициентов влияния водорода $\beta_{\bar{\sigma}_{iB}}$, $\beta_{\bar{\varepsilon}_{iB}}$

Влияние водорода на $\bar{\sigma}_{iB}$ и $\bar{\varepsilon}_{iB}$ аналогично влиянию водорода на стандартные характеристики механических свойств (рис. 3): водородное охрупчивание сплава ХН40МДТЮ наблюдается в интервале температур 200–500 °С.

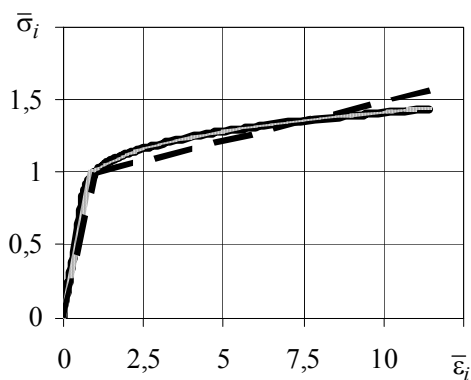
Результаты математической аппроксимации диаграммы деформирования сплава ХН40МДТЮ на воздухе и в водороде представлены в таблице и на рис. 6. Анализ диаграмм деформирования сплава ХН40МДТЮ показывает, что его поведение в области упругопластической деформации удовлетворительно описывается линейной функцией (3) (рис. 6, а). Повышение точности расчетов можно достичь применением степенной аппроксимации $\bar{\sigma}_i = A\bar{\varepsilon}_i^n$ (4), в этом случае разница между экспериментальными и расчетными значениями не превышает $\approx 2\%$ (рис. 6, а). Коэффициент A в формуле (4) для упрощения прочностных расчетов с точностью, достаточной для практического применения, можно принять равным ≈ 1 . При степенной аппроксимации диаграммы деформирования удобно представлять в логарифмических координатах, в этом случае коэффициент упрочнения n представляет собой тангенс угла наклона прямой $\ln \bar{\sigma}_i = n \ln \bar{\varepsilon}_i$ (рис. 6, б).

Таблица

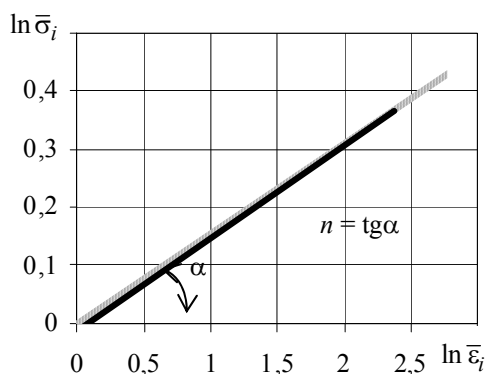
Параметры аппроксимационных зависимостей диаграмм деформирования

Температура, °C	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	Линейная аппроксимация				Степенная аппроксимация					
		воздух		водород		воздух			водород		
		\bar{E}_T	R^2	\bar{E}_T	R^2	A	n	R^2	A	n	R^2
20	2,084	0,039	0,855	0,038	0,882	0,99	0,142	0,988	0,97	0,162	0,991
200	1,956	0,047	0,837	0,053	0,951	1,0	0,158	0,995	0,99	0,158	0,996
300	1,885	0,048	0,786	0,063	0,926	1,0	0,156	0,998	1,0	0,144	0,998
400	1,800	0,051	0,806	0,057	0,889	0,99	0,160	0,997	0,99	0,136	0,986
500	1,750	0,048	0,716	0,058	0,813	1,01	0,141	0,998	1,01	0,134	0,987
600	1,663	0,058	0,775	0,055	0,790	1,02	0,143	0,998	1,02	0,144	0,997

$$R^2 - \text{величина достоверности аппроксимации, } R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\left(\sum Y_i^2\right) - \frac{(\sum Y_i)^2}{n}}$$



а



б

Рис. 6. Диаграммы деформирования сплава ХН40МДТЮ при температуре 600 °С: а – — эксперимент; линейная (— —) и степенная (—) аппроксимации; б – аппроксимированные диаграммы деформирования в логарифмических координатах: — — воздух; — — водород

Выводы

Проведены исследования водородостойкости сплава ХН40МДТЮ в диапазоне температур 20–600 °С и при давлении водорода 80 МПа; показано, что водородное охрупчивание проявляется в интервале 200–500 °С, при этом максимальное снижение механических свойств наблюдается при 300 °С.

Построены истинные диаграммы деформирования сплава ХН40МДТЮ при испытаниях на растяжение на воздухе и в водороде. Испытание образцов на растяжение в водороде приводит к более ранней локализации деформации (образование шейки), до момента образования шейки диаграммы деформирования на воздухе и в водороде практически совпадают во всем исследованном диапазоне температур (20–600 °С).

Определены параметры уравнений линейной и степенной аппроксимации диаграмм деформирования сплава ХН40МДТЮ, что позволяет использовать полученные зависимости $\bar{\sigma}_i = f(\bar{\epsilon}_i)$ для проведения прочностных расчетов элементов конструкций в упругопластической области.

Список литературы

1. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. М.: Metallurgy, 1985.
2. Арчаков Ю. А. Водородная коррозия стали. М.: Metallurgy, 1985.
3. Ткачев В. И., Холодный В. И., Левина И. Н. Работоспособность сталей и сплавов в среде водорода. Львов: Вертикаль, 1999.
4. Швед М. М. Изменение эксплуатационных свойств железа и стали под влиянием водорода. Киев, Наукова Думка, 1985.
5. Александрова О. В., Маркочев В. М. Математическое описание диаграмм деформирования. Заводская лаборатория. 2003. Т. 69, № 4. С. 49–52.
6. Caskey G. R., Jr. «Effect of Hydrogen on Work Hardening of Type 304L Austenitic Stainless Steel», DP-MS-80-129, April 27, 1981.
7. Федотов В. П. Моделирование диаграммы деформирования металлов при воздействии температуры и диффузии водорода. Металлы. 1997, № 3. С. 58–64.
8. Мороз Л. С., Чечулин Б. Б. Водородная хрупкость металлов. М.: Metallurgy, 1967.
9. Ульянов Е. А. Коррозионностойкие стали и сплавы. Справочник. М.: Metallurgy, 1991.
10. Шевнин Е. В., Бойцов И. Е., Фильчагин С. В., Туманова Н. Ю. Установка для испытаний образцов на растяжение в газообразном водороде при давлении до 70 МПа в интервале температур от – 150 °С до + 300 °С // Сб. докладов Четвертой международной Школы молодых ученых и специалистов «Взаим-

действие изотопов водорода с конструкционными материалами (IHISM-08 JUNIOR).» Нижний Новгород, 04–08 июля 2008 года. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 280–286.

11. Хабаров Ю. А., Базунов А. В., Бойцов И. Е. и др. Физико-механические свойства конструкционных материалов в водородосодержащих средах // Сб. докладов международного семинара «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-01.» Саров, 02–06 апреля 2001 года. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. С. 102–111.

12. Коршунов А. И., Кравченко Т. Н., Савельева О. М. К вопросу о построении диаграммы напряжений путем пересчета машинной диаграммы. Проблемы прочности. 1982. Т. 48, № 9. С. 93–95.

13. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003.

14. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. В двух частях. М.: Машиностроение, 1974.

15. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие. М.: Машиностроение, 1975.

16. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. Справочник. М.: Машиностроение, 1985.

17. Глинер Р. Е. Аппроксимационный анализ диаграмм растяжения. Заводская лаборатория. 2008. Т. 74, № 4. С. 64–66.

18. Ткачев В. И., Левина И. Н. Водородная деградация высокопрочных дисперсионно-твердеющих железоникелевых сплавов // Сб. докладов международного семинара «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-01.» Саров, 02–06 апреля 2001 года. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. С. 92–101.