

УДК621.785.6

МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ В БЕЗВОДОРОДНЫХ СРЕДАХ

П. В. КАПЛУН, В. А. ГОНЧАР

Хмельницкий национальный университет

Приведены результаты исследований малоциклового усталости при изгибе различных сталей после ионного азотирования в безводородных насыщающих средах. Даны рекомендации об области применения этой технологии упрочнения поверхности при эксплуатации. Сделан вывод о том, что ионным азотированием в безводородных средах можно в широких пределах изменять физико-механические свойства поверхностных слоев и существенно повышать малоцикловую усталостную прочность конструкционных сталей. Максимальной долговечности достигнуто оптимизацией технологических параметров диффузионного насыщения.

Ключевые слова: *усталость, изгиб, ионное азотирование, деформация, поверхность.*

Результаты исследований многоциклового усталости при изгибе конструкционных сталей после ионного азотирования выявили [1, 2] значительное увеличение их прочности. Предел выносливости образцов, предварительно ионно азотированных в безводородной среде (60 vol.% N₂ + 40 vol.% Ar), при испытаниях на воздухе возрос в 1,9 раза (с 190 до 370 МПа), а в 3%-ом растворе NaCl – в 3,6 раза (с 30 до 110 МПа) по сравнению с неазотированными. А азотированных в водородосодержащей среде (60 vol.% N₂ + 40 vol.% H₂) при испытаниях в 3%-ом NaCl на 25% ниже, нежели в безводородной. Причиной этого является вредное влияние водорода, вызывающего декогезию кристаллической решетки металла, взаимодействие его атомов в металле с дислокациями, давление молекулярного водорода в микрополостях стали, химическое его взаимодействие с компонентами сплава и выделение водородосодержащих фаз [3]. Безводородные насыщающие среды (смеси азота с аргоном) улучшают пластические свойства азотированных слоев вследствие более интенсивного обратного катодного распыления и образования на поверхности менее хрупких фаз, и даже α-фазы [4]. Вместе с тем для практики важно знать, при каких упругопластических деформациях и относительных удлинениях следует применять данную технологию, что и является целью исследования.

Методика испытаний. Применяли установку ИП-2 [5], позволяющую испытывать плоские образцы чистым отнулевым изгибом при упругопластическом деформировании с частотой 23 min⁻¹. Образцы из сталей 20; 45; 45X и 38ХМЮА после предварительной нормализации и улучшения изучали в различных средах: кислой (5 g/l буферного раствора лимонной кислоты и 10 g/l двухзамещенного фосфорнокислого натрия) с рН 6,5; щелочной (водный раствор окиси кальция) с рН 13; нейтральной (конденсат выпарных аппаратов) с рН 7,0. Их физико-механические характеристики до и после ионного азотирования при $T = 560^{\circ}\text{C}$, $P = 265 \text{ Pa}$, $\tau = 240 \text{ min}$, среда 75 vol.% N₂ + 25 vol.% Ar приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические характеристики образцов до и после упрочнения

Сталь	Предел текучести σ_T	Временное сопротивление σ_B	Относительное удлинение δ	Относительное сужение ψ
	МПа		%	
20	234 / 332	385 / 493	21 / 15	55 / 39
45	342 / 448	580 / 668	15 / 11	43 / 32
45X	846 / 834	1020 / 1003	10 / 6	51 / 26
38ХМЮА	875 / 948	1051 / 1182	9 / 5	42 / 22

Примечание: в числителе – данные до ионного азотирования, в знаменателе – после.

Результаты исследований. Установили (рис. 1), что в исследуемом диапазоне изменения амплитуд деформации ($\epsilon = 0,5 \dots 4,0\%$) долговечность азотированных и неазотированных образцов находится в пределах $10^2 \dots 10^5$ cycles до разрушения, а ее связь с деформацией описывает прямая линия в двойных логарифмических координатах количества циклов и амплитуд деформации при испытании материалов в различных средах. Если $\epsilon > 0,3\%$, долговечность азотированных образцов ниже, чем неазотированных, причем это понижение усиливается с ухудшением пластических свойств сталей (табл. 1) и ростом деформации. Это является общей закономерностью при малоциклового усталости испытываемых сталей [6].

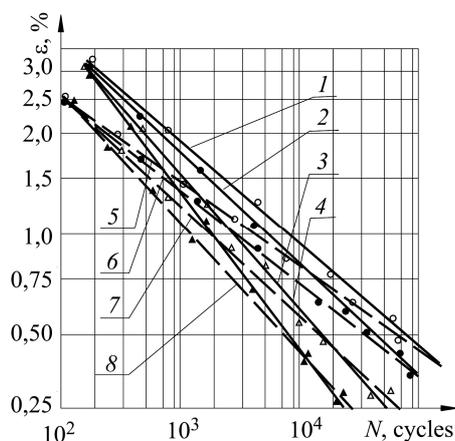


Рис. 1. Малоцикловая долговечность неупрочненных (1–4) и азотированных ($T = 560^\circ\text{C}$, $P = 265 \text{ Pa}$, $\tau = 4 \text{ h}$) (5–8) сталей 45X (1, 8), 38ХМЮА (2, 7), 45 (3, 6) и 20 (4, 5) в кислой среде.

Fig. 1. Low-cycle durability of unreinforced (curves 1–4) and nitrided ($T = 560^\circ\text{C}$, $P = 265 \text{ Pa}$, $\tau = 4 \text{ h}$) (5–8) 45X (1, 8), 38ХМЮА (2, 7), 45 (3, 6) and 20 (4, 5) steels in acidic medium.

Коррозионная среда более ощутимо уменьшает малоцикловую долговечность высокопрочных сталей [7]. При одинаковых деформациях в них возникают высокие напряжения, ускоряющие коррозию в вершинах трещин. Поэтому при существенной деформации азотированные стали 45 и 20 имеют большую долговечность, нежели 45X и 38ХМЮА (рис. 1).

Число циклов до разрушения азотированных и неупрочненных образцов стали 45X в щелочной среде больше, чем на воздухе, нейтральной и кислой средах (рис. 2). Это можно объяснить тем, что в этих условиях на их поверхности образуется гидрооксидный слой [6], способствующий повышению долговечности. При значительном электрохимическом растворении сталей в кислой среде интенсивно формируются концентраторы напряжений, снижающие их усталостную прочность. В менее коррозионно-активной среде малоцикловая долговечность азотированной и неазотированной стали 45X выше. Однако с увеличением ам-

плитуды деформации влияние среды на долговечность ослабевает и усиливается роль пластической деформации. Долговечность азотированных при $\epsilon \approx 2,5\%$ и неазотированных при $\epsilon \approx 4\%$ образцов на воздухе и в коррозионных средах совпадает.

Рис. 2. Малоцикловая долговечность улучшенной (кривые 1–4) и азотированной ($T = 560^\circ\text{C}$, $P = 265 \text{ Pa}$, $\tau = 4 \text{ h}$) (5–8) стали 45X при испытаниях в различных средах: 1, 5 – щелочная (pH 13); 2, 6 – воздух; 3, 7 – нейтральная (pH 7); 4, 8 – кислая (pH 6,5).

Fig. 2. Low-cycle durability of improved (1–4) and nitrided ($T = 560^\circ\text{C}$, $P = 265 \text{ Pa}$, $\tau = 4 \text{ h}$) (5–8) 45X steel when tested in various media: 1, 5 – alkaline (pH 13); 2, 6 – air; 3, 7 – neutral (pH 7); 4, 8 – acidic (pH 6.5).

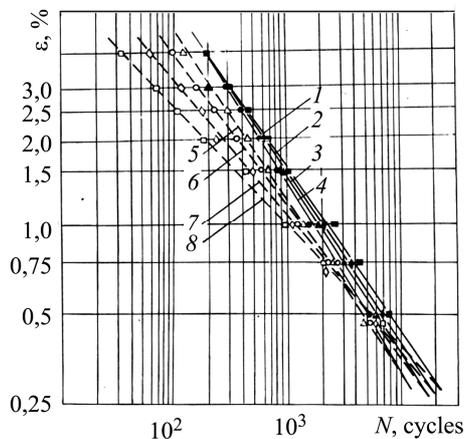


Таблица 2. Влияние технологических параметров ионного азотирования на количество циклов до разрушения образцов при упругопластическом деформировании ($\epsilon = 0,75\%$) в кислой среде

Сталь	Режимы ионного азотирования										
	N_2 , $P = 265 \text{ Pa}$, $\tau = 4 \text{ h}$ при T , $^\circ\text{C}$			$T = 560^\circ\text{C}$, $P = 265 \text{ Pa}$, $\tau = 4 \text{ h}$ при содержании N_2 (в %) в среде $\text{N}_2 + \text{Ar}$					$T = 560^\circ\text{C}$, $\tau = 4 \text{ h}$, среда 75 vol.% $\text{N}_2 +$ $+ 25 \text{ vol.}\% \text{ Ar}$ при P , Pa		
	520	560	600	45	60	75	90	100	80	265	450
20	2694	2536	2416	2518	2524	2581	2553	2536	2519	2581	2540
45	2843	2621	2482	2619	2642	2694	2661	2621	2596	2694	2598
45X	3156	2395	1693	2408	2425	2492	2394	2315	2388	2492	2428
38ХМЮА	3191	2484	2028	2415	2427	2485	2459	2484	2395	2485	2446

Установили (табл. 2), что наиболее существенно на малоцикловую усталость сталей влияет температура процесса азотирования. С ее повышением от 520°C до 600°C долговечность образцов при испытаниях в кислой среде и упругопластической деформации $\epsilon \approx 0,75\%$ уменьшилась в 1,1–1,9 раза, причем большее значение относится к более высокопрочным сталям 45X и 38ХМЮА. Ее снижение при малоцикловой усталости с повышением температуры азотирования связано не только с изменением физико-механических характеристик и фазового состава азотированного слоя, но и структуры основного металла, особенно при температурах выше эвтектоидной [1, 2, 6]. Причем воздействие последних тем сильнее, чем больше значение упругопластической деформации при циклическом нагружении. Влияние азотного потенциала и давления насыщающей среды на малоцикловую выносливость менее значимо и носит экстремальный характер с максимумами в среде 75 vol.% $\text{N}_2 + 25 \text{ vol.}\% \text{ Ar}$ и давлении 265 Pa.

ВЫВОДЫ

Результаты исследований малоцикловой усталости сталей свидетельствуют о нецелесообразности азотирования при упругопластической деформации $\epsilon \geq 0,3\%$,

так как их долговечность в этом случае ниже, чем азотированных в аналогичных условиях. Ионным азотированием в безводородных средах можно в широких пределах изменять физико-механические свойства поверхностных слоев, значительно повысить малоцикловую усталостную прочность конструкционных сталей при изгибе в различных средах. Максимальная долговечность достигается оптимизацией технологических параметров диффузионного насыщения.

РЕЗЮМЕ. Наведено результати досліджень малоциклової втоми під час згину різних сталей після іонного азотування у зневоднених насичувальних середовищах. Подано рекомендації про область застосування такого зміцнення поверхні під час експлуатації. Зроблено висновок про те, що іонне азотування у зневоднених середовищах дає можливість у широких межах змінювати фізико-механічні властивості поверхневих шарів та суттєво підвищувати малоциклову втомну міцність конструкційних сталей. Максимальної довговічності досягнуто оптимізацією технологічних параметрів дифузійного насичення.

SUMMARY. The results of experimental studies of low-cycle fatigue in bending of various steels after ion nitriding in hydrogen-free environments are presented. Recommendations concerning the application field of such technology of surface hardening in operation are proposed. On the basis of these studies it is concluded that the ion nitriding technology in hydrogen-free environment allows us to vary widely the physical and mechanical properties of the surface layers and to improve significantly low-cycle fatigue strength of structural steel under bending in different media. Maximum durability is achieved by optimizing the technological parameters of the diffusion process of saturation.

1. Каплун В. Г., Капинос А. В., Бабей Ю. И. Влияние ионного азотирования на сопротивление усталости стали 20 при изгибе // Физ.-хим. механика материалов. – 1988. – № 5. – С. 108–109.
2. Влияние параметров ионного азотирования на выносливость стали 45Х в кислой среде / В. Г. Каплун, А. Е. Рудык, Я. Н. Гладкий, М. С. Стечишин // Физ.-хим. механика материалов. – 1986. – 22, № 5. – С. 101–103.
(Influence of the parameters of ion nitriding on the endurance of 45Kh steel in an acid medium / V. G. Kaplun, A. E. Rudyk, Ya. N. Gladkii, S. M. Stechishin // Materials Science. – 1986. – 22, № 5. – P. 535–538.)
3. Механика разрушения и прочность металлов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка / В. В. Панасюк, А. Е. Андрейкив и др. – Т. 1. Основы механики разрушения. – К.: Наук. думка, 1988. – 488 с.
4. Каплун В. Г., Пастух И. М. Плазменно-диффузионные процессы модификации поверхности металлов: технология и оборудование // Тр. науч.-практ. симп. “Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении”. – Харьков: ОТТОМ, 2000. – С. 145–154.
5. Ткачев В. И., Бабей Ю. И. Машина ИП-2 для испытаний металлов на малоцикловую усталость в жидких средах // Физ.-хим. механика материалов. – 1966. – 2, № 2. – С. 228–229.
(Tkachev V. I., Babei Yu. I. Type IP-2 machine for short-endurance fatigue tests on metals in liquid media // Materials Science. – 1966. – 2, № 2. – P. 167–168.)
6. Карпенко Г. В. Физико-химическая механика конструкционных металлов: в 2-х т. – К.: Наук. думка, 1985. – Т. 1. – 228 с.
7. Улич Г. Коррозия металлов. – М.: Металлургия, 1968. – 308 с.

Получено 08.09.2015