

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ НА ПРИРОСТ ТВЕРДОСТИ ПОСЛЕ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ

Моисеенко А.Н.

Физико-технический институт НАН Беларуси,  
г. Минск, Республика Беларусь

*Исследовано влияние химического состава стали марки 40X на прирост твердости при ионном азотировании в диапазоне температур 490–550 °С, а также влияние химического состава и твердости сердцевины сталей 18ХГТ и 20MnCrS5 на твердость при ионном азотировании при температуре 480 °С. Экспериментально установлено, что для стали 40X прирост твердости азотированного слоя имеет большие значения, чем рассчитанные по литературным данным. Показано, что для сталей 18ХГТ и 20MnCrS5 твердость азотированного слоя зависит от твердости сердцевины и может составлять величину более чем 700 HV.*

**Ключевые слова:** ионное азотирование, конструкционные стали, прирост твердости азотированного слоя

## INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF CONSTRUCTION STEELS ON THE GROWTH OF HARDNESS IN THE PLASMA NITRIDING PROCESS

A. Maiseyenka

Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Minsk, Republic of Belarus

*In this paper was studied influence of the chemical composition of 40X steel at plasma nitriding in the temperature range 490–550 °C on the increase in hardness of the nitrided layer. Has been investigated effect of the chemical composition and hardness of the core of 18ХГТ, 20MnCrS5 steels with plasma nitriding at a temperature of 480 °C, the hardness of the nitrided layer. It is shown that for 40X steel, the increase in hardness of the nitrided layer is greater than the value calculated from the literature data. It is shown that for steels of grade 18ХГТ, 20MnCrS5, the hardness of the nitrided layer does depend on the hardness of the core, and the hardness of the nitrided layer can be more than 700 HV.*

**Keywords:** plasma nitriding, constructional steels, increase hardness of the nitrided layer

**E-mail:** maiseyenka.a.n@gmail.com

## Введение

Одним из главных параметров азотированного слоя, устанавливаемых конструкторской документацией (КД), является его твердость. Из литературы хорошо известно, что для разных марок сталей, в зависимости от степени их легирования нитридообразующими элементами, в КД задаются различные требования по твердости азотированного слоя [1].

Согласно литературным данным [2,3], твердость азотированного слоя HV зависит как от твердости сердцевины стали, полученной в процессе предшествующей термической обработки, так и от концентрации и типа легирующих элементов в стали.

В работе [3] показано, что разные легирующие элементы вносят различный вклад в твердость азотированного слоя (рис. 1). При этом для сталей, содержащих несколько легирующих элементов, возможно получить более высокие значения твердости, чем если бы легирующие элементы использовались отдельно [3].

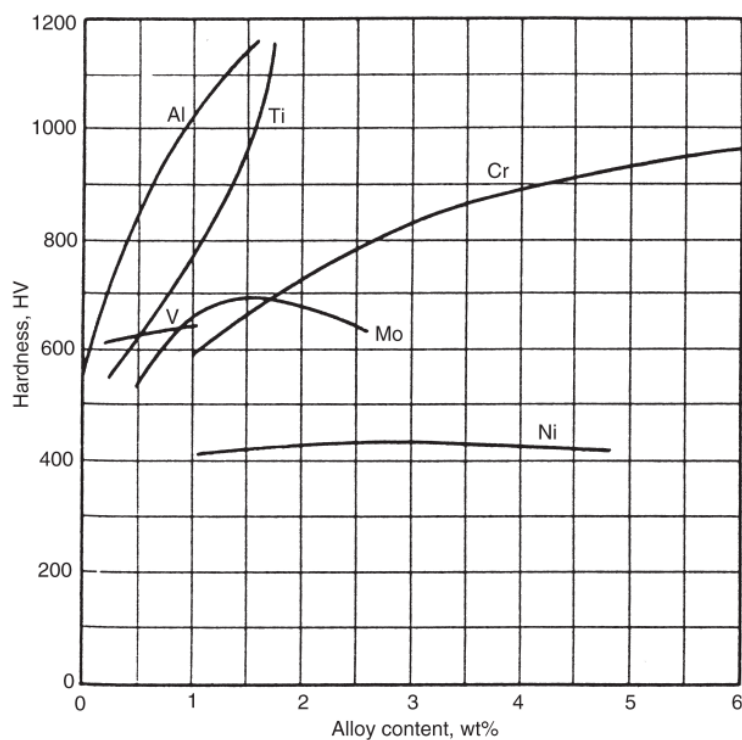


Рис. 1. Влияние легирующих элементов на твердость после азотирования.  
Химический состав основы: С – 0,35 %, Si – 0,3 %, Mn – 0,7 %

В литературе также отмечено [1, 2], что твердость азотированного слоя зависит от температуры изотермической выдержки в процессе азотирования – чем она выше, тем ниже твердость. Данный факт связывают с увеличением размеров нитридов легирующих элементов, образующихся в процессе азотирования [1].

Поскольку различные легирующие элементы вносят разный вклад в прирост твердости, то при азотировании даже одной марки стали будут наблюдаться колебания полученной твердости азотированного слоя в зависимости от концентрации того или иного легирующего элемента. Для нивелирования этого фактора в КД задается определенный диапазон твердости азотированного слоя.

**Целью работы** является проведение теоретических расчетов по известным методикам прироста твердости для стали 40X вследствие ионного азотирования (с учетом влияния концентрации легирующих элементов и температуры азотирования) и срав-

нение полученных теоретических расчетов с экспериментальными данными, а также оценка влияния твердости сердцевины на твердость азотированного слоя для сталей 18ХГТ и 20MnCr5.

### Материалы и методики исследования

Из работы [2] известно, что твердость азотированного слоя HV может быть выражена уравнением (1)

$$HV = HV_c + \Delta HV, \quad (1)$$

где HV – твердость азотированного слоя;  $HV_c$  – твердость сердцевины, полученная в процессе предшествующей термической обработки;  $\Delta HV$  – прирост твердости при азотировании в зависимости от концентрации легирующих элементов и температуры изотермической выдержки.

В свою очередь, прирост твердости  $\Delta HV$  зависит от параметра  $g_c$  – приведенная свободная энергия нитридообразования [2]. Согласно [4],  $g_c$  и  $\Delta HV$  для сталей с содержанием углерода 0,2–0,45 % связаны уравнением (2)

$$\Delta HV = 262,2 \ln(g_c) + 659,8. \quad (2)$$

Согласно данным [2], свободная энергия нитридообразования –  $g_c$  является суммой  $g_i$  – свободной энергии образования  $i$ -го нитрида легирующего элемента, которая, в свою очередь, связана с мольной долей  $i$ -го легирующего элемента в стали уравнением (3)

$$g_c = \frac{\Delta G_0}{RT} = \sum \frac{N_i}{x_i} g_i, \quad (3)$$

где  $\Delta G_0$  – изменение свободной стандартной энергии при образовании нитридов;  $N_i$  – мольная доля  $i$ -го легирующего элемента;  $x_i$  – стехиометрический коэффициент в реакции образования нитридов (табл 1);  $g_i$  – приведенная свободная энергия образования нитрида легирующего элемента.

В свою очередь мольная доля  $i$ -го легирующего элемента  $N_i$  связана с концентрацией  $i$ -го элемента [2] уравнением (4)

$$N_i = \frac{m_i / Mr_i}{\sum_i^k (m_i / Mr_i + \dots + m_k / Mr_k)}, \quad (4)$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -го элемента,  $Mr_i$  – молярная масса  $i$ -го элемента.

Если расчет  $N_i$  вести для образца массой 100 г, то уравнение примет следующий вид (5)

$$N_i = \frac{C_i / Mr_i}{\sum_i^k (C_i / Mr_i + \dots + C_k / Mr_k)}, \quad (5)$$

где  $C_i$  – концентрация  $i$ -го элемента в % мас.

Приведенная свободная энергия образования нитрида легирующего элемента  $g_i$  выражается уравнением (6) [2]

$$g_i = a_i + \frac{b_i}{T}, \quad (6)$$

где  $a_i$  и  $b_i$  – коэффициенты нитрида легирующего элемента (табл. 1).

Табл. 1

**Коэффициенты  $x_i$ ,  $a_i$  и  $b_i$  для нитридов легирующих элементов, учитываемых в расчетах  $g_c$  [2]**

Нитрид	$x_i$	$a_i$	$-b_i$	Нитрид	$x_i$	$a_i$	$-b_i$
CrN	1	8,4	12800	NbN	1	10,1	28400
Mo <sub>2</sub> N	2	6,9	8000	AlN	1	12,3	38350
W <sub>2</sub> N	2	10,1	8500	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3	38,2	87250
VN	1	9,9	20850	Mn <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	3	16,7	22450
TiN	1	11,2	40000				

С использованием приведенных выше данных, можно смоделировать влияние каждого из нитридообразующих элементов на прирост твердости  $\Delta HV$  стали марки 40X в результате азотирования. Моделирование проводилось следующим образом: концентрация выбранного легирующего элемента изменялась от минимальной до максимальной согласно ГОСТ 4543-71 (табл. 2), при этом концентрация остальных легирующих элементов принималась средней из диапазона согласно указанному ГОСТ.

Табл. 2

**Химический состав стали марки 40X согласно ГОСТ 4543-71**

Содержание легирующего элемента в стали, % масс.				
	C	Si	Mn	Cr
Минимум	0,36	0,17	0,5	0,8
Максимум	0,44	0,37	0,8	1,1

Результаты моделирования влияния каждого из нитридообразующих элементов на величину  $\Delta HV$  приведены на (рис. 2).

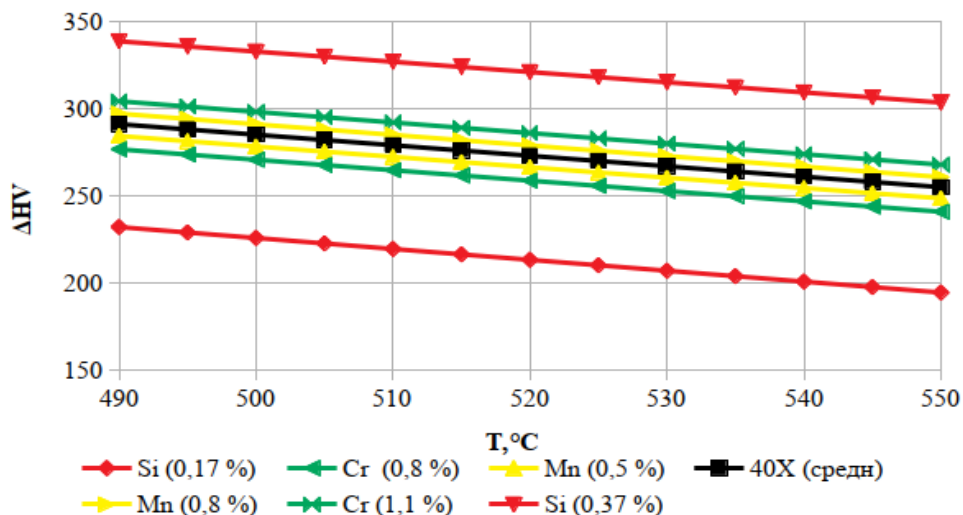


Рис. 2. Влияние колебания концентрации легирующих элементов (% масс) на прирост твердости  $\Delta HV$  для стали 40X в диапазоне температур азотирования 490–550  $^\circ C$

Проведенное моделирование показало, что согласно расчетам по данным работ [2, 4], колебания концентрации Si вносят наиболее значительный вклад в изменение прироста твердости  $\Delta HV$ , в то время как колебания концентрации Cr и Mn оказывают незначительное влияние.

Однако, наибольший интерес представляет практическое применение данных расчетов для прогнозирования твердости азотированного слоя и, как следствие, на выбор температуры изотермической выдержки.

Для этого проводились эксперименты по ионному азотированию образцов сталей 40X, 18XГТ и 20MnCrS5; концентрация легирующих элементов и твердость основы для этих сталей приведена в табл. 3 – данные получены с помощью эмиссионного спектрометра SPECTROTEST (SPECTRO Analytical Instruments) с искровым возбуждением.

**Табл. 3**

**Химический состав сталей**

Марка стали	Содержание легирующего элемента в стали, % мас.									HV сердцевины
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Ti	V	
40X	0,36	0,28	0,52	0,84	0,016	0,1	0,027	0,009	0,003	245
№1 (18XГТ)	0,21	0,30	0,93	1,10	0,019	0,11	0,009	0,066	0,006	190
№2 (18XГТ)	0,20	0,29	0,92	1,11	0,017	0,11	0,009	0,066	0,006	230
№3 (20MnCrS5)	0,20	0,22	1,21	1,01	0,022	0,14	0,025	0,007	0,002	210
№4 (20MnCrS5)	0,20	0,23	1,21	1,02	0,023	0,14	0,025	0,007	0,002	270

Ионное азотирование образцов проводилось на установке промышленного типа модели УА- 63- 960/1400 [5] производства ФТИ НАН Беларуси в диапазоне температур 490–550 °С, рабочая смесь газов состояла из Ar, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>. Измерения распределения микротвердости по глубине азотированного слоя проводились на поперечном шлифе образца с помощью микротвердомера AFFRI-MVDM8 (нагрузка на индентор – 100 г). Данные по микротвердости азотированного слоя для всех экспериментов получены на расстоянии 50 мкм от края образца.

Расчетные значения прироста твердости для образца из стали 40X с химическим составом (табл. 3), а также экспериментальные данные по влиянию температуры изотермической выдержки на прирост твердости  $\Delta HV$ , полученные после ионного азотирования образца стали 40X, приведены на рис. 3.

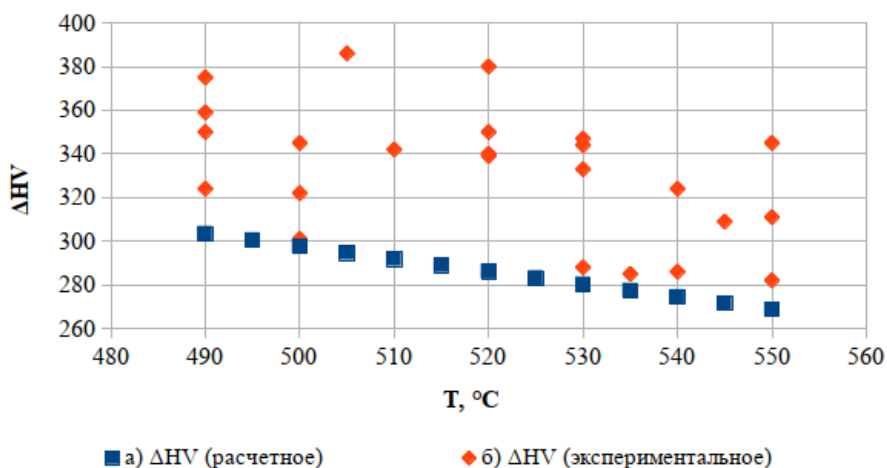


Рис. 3. Изменение прироста твердости  $\Delta HV$  для стали 40X с химическим составом (табл. 2) в зависимости от температуры изотермической выдержки: а – расчетное значение  $\Delta HV$  (по данным работы [2, 4]), б – экспериментально полученное значение  $\Delta HV$

Полученные экспериментальные данные по влиянию температуры изотермической выдержки на прирост твердости  $\Delta HV$  не согласуются с результатами расчетов, приведенными в [2], однако общая тенденция к уменьшению твердости с ростом температуры сохраняется.

Обобщение полученных экспериментальных данных для стали 40X позволяет внести корректировочный коэффициент в уравнение 2, т.е. если к расчетному значению  $\Delta HV$  прибавить 50, то с неплохой точностью можно предсказать твердость азотированного слоя и использовать эти данные в расчетах.

Поскольку эксперименты проводились с образцами стали 40X имеющими одинаковый химический состав оценить влияние каждого из легирующих элементов на данный момент невозможно.

Исследования по влиянию твердости сердцевины на твердость азотированного слоя проводились на образцах сталей 18ХГТ и 20MnCrS5, химический состав и твердость сердцевины которых приведены в табл. 3.

Ионное азотирование проводилось при температуре 480 °С, расчет величины  $\Delta HV$  и измерения микротвердости – аналогично предыдущему эксперименту. Результаты приведены на рис. 4.

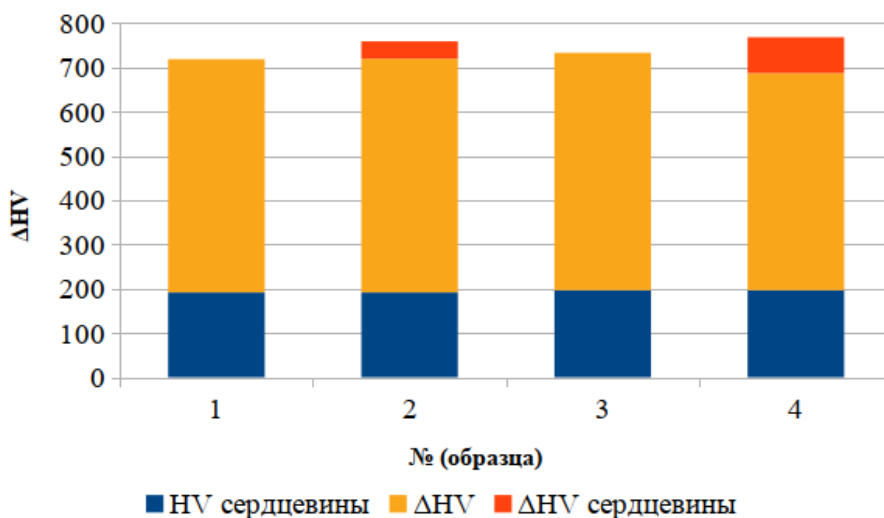


Рис. 4. Твердость азотированного слоя для образцов стали: №1 (18ХГТ), 2) №2 (18ХГТ), №3 (20MnCrS5), №4 (20MnCrS5)

Экспериментально подтверждено, что прибавка к твердости сердцевины для образцов №2 (18ХГТ) и №4 (20MnCrS5) увеличивает твердость азотированного слоя по сравнению с образцами №1 (18ХГТ) и №3 (20MnCrS5). Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с данными приведенными в работах [2, 4], а уравнение (1) позволяет вычислить прирост твердости  $\Delta HV$  после азотирования.

### Заключение

1. Полученные экспериментальные данные по влиянию температуры изотермической выдержки на величину прироста твердости  $\Delta HV$  для стали 40X не согласуются с результатами расчетов, приведенными в [2] – величина прироста твердости  $\Delta HV$  больше по сравнению с расчетными значениями: для стали 40X в среднем на 50 единиц HV, для стали 18ХГТ, 20MnCrS5 на 200 единиц HV. Причиной несовпадения может быть тот фактор, что расчет учитывает только прирост твердости за счет образования нитридов легирующих элементов и не учитывается образование нитридов железа и твердорастворное упрочнение стали.

2. Общая тенденция изменения  $\Delta HV$ , как функции концентрации легирующих элементов в стали 40X сохраняется, а по результатам проведенных экспериментов для стали 40X можно предложить добавку – +50 HV к расчетному значению, которая будет близка к экспериментальному значению и позволит предсказывать твердость полученного азотированного слоя.

3. Поскольку имеется корреляция между твердостью сердцевины и твердостью азотированного слоя, то в КД необходимо задавать требования к твердости азотированного слоя в зависимости от твердости сердцевины изделия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов, С.А. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов / С.А. Герасимов. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – С 518.
2. Лахтин, Ю.М. Химико-термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин. – Москва: Metallurgia, 1985. – С. 256.
3. Thelning, K.E. Nitriding, Steel and its Heat Treatment / K.E. Thelning // 2nd ed., Butterworths, 1984, p 492–544.
4. Хасанова, Л.А. Совершенствование технологического процесса азотирования на основе методов статистического анализа и моделирования / Л.А. Хасанова. – Рыбинск 2009, автореферат диссертации.
5. Босяков, М.Н. Выбор режима упрочняющей обработки на установках ионного-азотирования промышленного типа / М.Н. Босяков, А.Н. Моисеенко // Современные методы и технологии создания материалов – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2016, №2. – С. 50–58.

#### REFERENCES

1. Gerasimov S.A. Struktura i iznosostoičnost azotirovannykh konstruksionnykh stalei i splavov [Structure and wear resistance of nitrided structural steels and alloys]. Moscow: MG TU im N.E. Bauman, 2012, P. 390. (in Russian)
2. Lahtin Yu.M. Himiko-termicheskaya obrabotka metallov [Chemical heat treatment of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1985, P. 256. (in Russian)
3. K.E. Thelning, Nitriding, Steel and its Heat Treatment, 2nd ed., Butterworths, 1984, Pp. 492–544.
4. Hasanova L.A. Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo processa azotirovaniya na osnove metodov statisticheskogo analiza i modelirovaniya [Perfection of technological process of nitriding on the basis of methods of statistical analysis and modeling] / Ryabinsk 2009, avtoreferat disertacii. (in Russian)
5. Bosyakov M.N., Maiseyenko A.N. Vybora rezhima uprochniaiushchei obrabotki na ustanovkakh ionnogo-azotirovaniia promyshlennogo tipa [Selection of the regime of strengthening processing at ion-nitriding installations of industrial type]. Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniia materialov, Minsk: PTI NAS Belarus, 2016, №2. P. 50–58. (in Russian)

*Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 30.05.18*