

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №12 (174). С.3-12.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №12 (174). P.3-12.

Научная статья
УДК 621.785.53
doi: 10.30987/2223-4608-2025-11-3-12

Применение стадийного процесса азотирования для снижения хрупкости легированных азотированных сталей

Лариса Георгиевна Петрова¹, д.т.н.
Ирина Станиславовна Белашова², д.т.н.
Михаил Анатольевич Фролов³, аспирант
Александр Юрьевич Малахов⁴, к.т.н.

^{1, 2, 3, 4} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия

¹ petrova_madi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7248-2454>

² irina455@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1395-1027>

³ michcool@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ malahov-alex@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. В статье представлено сравнительное исследование влияния азотирования на ударную вязкость и характеристики хладноломкости легированных сталей марок 38Х2МЮА и 40ХН2МА. Рассмотрены процессы стадийного азотирования с чередованием насыщающей среды в виде смеси аммиака с воздухом и чистого аммиака, в которых варьировались температуры и продолжительность процесса. Проведено экспериментальное исследование, направленное на установление корреляции между параметрами процесса азотирования и ударной вязкостью образцов в диапазоне температур от + 20 до - 60 °С. Представлены результаты испытаний на ударный изгиб, демонстрирующие зависимость вязкости от температуры испытаний и режимов азотирования. Выполнен микроструктурный анализ азотированных слоёв, включающий металлографические исследования и измерение микротвёрдости с построением профилей твёрдости по глубине. Установлено, что температура и время стадийного азотирования оказывают существенное влияние на формирование поверхностного слоя, его микротвёрдость и, как следствие, на ударную вязкость и хладостойкость сталей. В статье представлено сравнительное исследование влияния азотирования на ударную вязкость и характеристики хладноломкости легированных сталей марок 38Х2МЮА и 40ХН2МА. Рассмотрены процессы стадийного азотирования с чередованием насыщающей среды в виде смеси аммиака с воздухом и чистого аммиака, в которых варьировались температуры и продолжительность процесса. Представлены результаты испытаний на ударный изгиб, демонстрирующие зависимость вязкости от температуры испытаний и режимов азотирования. Выполнен микроструктурный анализ азотированных слоёв, включающий металлографические исследования и измерение микротвёрдости с построением профилей твёрдости по глубине. Показано, что условия стадийного азотирования оказывают существенное влияние на формирование поверхностного слоя, его микротвёрдость и, как следствие, на ударную вязкость и хладостойкость сталей. Предложены рациональные режимы азотирования для максимального сохранения ударной вязкости азотированной стали 40ХН2МА для работы при нормальной температуре и в условиях отрицательных температур.

Ключевые слова: азотирование, легированная сталь, ударная вязкость, хладноломкость, микроструктура, микротвёрдость

Для цитирования: Петрова Л.Г., Белашова И.С., Фролов М.А., Малахов А.Ю. Применение стадийного процесса азотирования для снижения хрупкости легированных азотированных сталей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 12 (174). С. 3–12. doi: 10.30987/2223-4608-2025-12-3-12

Stage nitrogen hardening process used for reducing brittleness of alloyed nitrited steels

Larisa G. Petrova¹, D. Eng.

Irina S. Belashova², D. Eng.

Mikhail A. Frolov³, PhD student

Alexander Yu. Malakhov⁴, PhD. Eng.

^{1, 2, 3, 4} Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University, Moscow, Russia

¹ petrova_madi@mail.ru

² irina455@inbox.ru

³ michcool@mail.ru

⁴ malahov-alex@ya.ru

Abstract. The article presents a comparative research of the nitrogen hardening effect on the impact hardness and coldbrittleness characteristics of alloy steels of the following grades 38Cr2MoAl and 40CrNi2MoA. Nitrogen hardening processes with saturating media interchange in the form of either an ammonia-air mixture or pure ammonia, in which the temperatures and duration of the process varied, are viewed. An experimental study was conducted to establish a correlation between the parameters of the nitrogen hardening process and the impact hardness of the samples in the temperature range from +20 to -60 °C. The results of impact bending tests are presented, proving the dependence of viscosity on the test temperature and nitrogen hardening modes. A microstructure of the nitrited layers has been analyzed, including metallographic studies and measurement of microhardness with the construction of hardness profiles in depth. It is found that the temperature and time of the stage nitrogen hardening process have a significant effect on the formation of the surface layer, its microhardness and, as a result, on the toughness and cold stability of steels. The article presents a comparative research of the nitrogenization effect on the impact hardness and coldbrittleness characteristics for alloy steels of grades 38Cr2MoAl and 40CrNi2MoA. Rational nitrogenization modes are proposed to maximize the impact strength of 40CrNi2MoA nitrited steel for operation at normal temperatures and in subzero temperatures.

Keywords: nitrogenization, alloy steel, impact hardness, coldbrittleness, microstructure, microhardness

For citation: Petrova L.G., Belashova I.S., Frolov M.A., Malakhov A.Yu. Stage nitrogen hardening process used for reducing brittleness of alloyed nitrited steels / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 12 (174). P. 3–12. doi: 10.30987/2223-4608-2025-12-3-12

Введение

Процесс азотирования – широко используемый способ поверхностного упрочнения, который значительно повышает твёрдость, износостойкость, усталостную прочность, а некоторых случаях, и коррозионную стойкость стальных деталей [1]. Этот процесс является разновидностью химико-термической обработки и заключается в насыщении стальной поверхности азотом. Чаще всего азотированию подвергают среднеуглеродистые стали, легированные хромом, никелем, молибденом, алюминием. Сформированный азотированный слой упрочняется за счёт выделения нитридов легирующих элементов, что значительно улучшает механические характеристики стали, в том числе, в сложных условиях эксплуатации.

Так, азотированные изделия из конструкционных среднеуглеродистых легированных сталей используются в арктической инфраструктуре [2]. Проблема безотказности силовых деталей машин в арктических условиях и северных регионах усугубляется тем, что они испытывают как статические, так и

динамические нагрузки в условиях низких температур [3]. Это накладывает дополнительные требования к ударной вязкости и хладостойкости сталей.

В подавляющем большинстве случаев азотирование, как и другие виды поверхностного упрочнения, оказывает негативное воздействие на эти характеристики свойств [4–6]. Влияние различных процессов азотирования на ударную вязкость сталей в различных температурных диапазонах остаётся малоизученным вопросом. В ВИАМ разработаны режимы азотирования низкоуглеродистых сталей аустенитного класса, позволяющих сохранить удовлетворительную вязкость при отрицательных температурах [7]. Для сталей мартенситного класса применено стадийное азотирование с изменением состава насыщающей среды, сохраняющее вязкость при комнатной температуре на 77 % по сравнению с неазотированной сталью [8].

Описанные результаты получены на высоколегированных низкоуглеродистых сталях. Однако предлагаемые для них режимы азотирования не могут быть напрямую

использованы для среднеуглеродистых сталей, поскольку они по своей природе более склонны к охрупчиванию. В связи с этим, изыскание технологических решений по минимизации негативного влияния азотирования на вязкость традиционных азотируемых сталей сохраняет свою актуальность. Концепция стадийного азотирования в газоциклическом режиме [9] в данном случае может быть взята за основу.

Целью работы является определение технологических режимов азотирования среднеуглеродистых конструкционных сталей, обеспечивающих максимально возможное сохранение ударной вязкости сталей, в том числе, при отрицательных температурах, а также установление взаимосвязи между

условиями азотирования и ударной вязкостью сталей с учётом закономерностей микроструктурных изменений.

Методика исследования и применяемое оборудование

Для экспериментальных исследований использованы образцы сталей марок 38Х2МЮА и 40ХН2МА, химические составы которых представлены в табл. 1. Выбор высококачественных сталей с пониженным содержанием серы и фосфора ($< 0,025\%$) обусловлен соображениями снижения негативного влияния этих примесей на вязкость и хладноломкость.

1. Химический состав исследуемых сталей по ГОСТ 4543-2016

1. Chemical composition of the studied steels according to the State Standard (GOST) 4543-2016

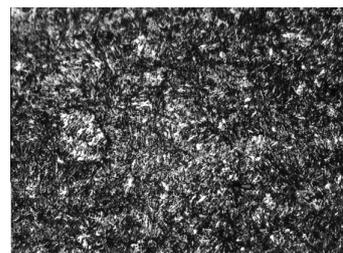
Марка стали	Концентрация элементов, % по массе						
	C	Cr	Ni	Mo	Al	Si	Mn
38Х2МЮА	0,35...0,42	1,35...1,65	-	0,15...0,25	0,70...1,10	0,20...0,45	0,30...0,60
40ХН2МА	0,37...0,44	0,60...0,90	1,25...1,65	0,15...0,25	-	0,17...0,37	0,50...0,80

Для ударных испытаний были изготовлены стандартные образцы размером $10 \times 10 \times 55$ мм с U-образным надрезом (рис. 1). Предварительная термическая обработка стали 38Х2МЮА заключалась в нормализации, а

стали 40ХН2МА включала закалку с $850\text{ }^\circ\text{C}$ в масле и отпуск при $620\text{ }^\circ\text{C}$, которая обеспечивала получение структуры зернистого сорбита. Данная структура сердцевинки обладает наиболее высокими показателями ударной вязкости.



а)



б)

Рис. 1. Вид образцов для испытаний на ударный изгиб и микроструктура предварительно термообработанной стали 38Х2МЮА, $\times 500$ (сорбит зернистый)

Fig. 1. Type of images for impact bending tests and microstructure of preliminary heated steel 38Cr2MoAl, $\times 500$ (granular sorbitol)

Перед азотированием образцы прошли подготовку поверхности, которая включала шлифовку и очистку ацетоном для удаления загрязнений.

Азотирование проводилось в электропечи с системой контроля диссоциации

аммиака. В качестве насыщающей среды использовали аммиак и смеси аммиака с воздухом. Параметры азотирования варьировались в соответствии с разработанной матрицей режимов (табл. 2).

2. Матрица режимов азотирования

2. Matrix of nitrogenization modes

Режим азотирования	Стандартный	Стадийный					
		40ХН2МА					
Сталь	38Х2МЮА	40ХН2МА					
Температура, °С	540	500	530	560	500	530	560
Время процесса, ч	36	I стадия – 7, II стадия – 3			I стадия – 14, II стадия – 6		
Газовая атмосфера	100 % NH ₃	I стадия – 80 % NH ₃ + 20 % воздух, II стадия – 100 % NH ₃					

На азотированных образцах проводили испытания на ударный изгиб на установке TestSystems при различных температурах от 20 до - 60 °С по ГОСТ 9454-78 [11]. Захлаживание образцов осуществлялось в климатической камере; в качестве хладагента использовался жидкий азот. Значения ударной вязкости *KCU* рассчитывались по измеренным показателям поглощённой энергии удара и усреднялись по трём измерениям. Расчёт производился по формуле

$$KCU = A/S_0, \quad (1)$$

где *A* – работа, затраченная на разрушение образца, Дж; *S₀* – площадь поперечного сечения образца в месте надреза, см².

На разрушенных образцах проводили исследования изломов с визуальной оценкой вязкой и хрупкой составляющих. Из образцов, подвергнутых ударным испытаниям, изготавливали микрошлифы для металлографического анализа и измерения микротвёрдости. Оптическая микроскопия проводилась с использованием металлографического микроскопа μVizo-MET.

Испытания на микротвёрдость проводились на приборе ПМТ-3 с использованием

нагрузки 100 г. Профили микротвёрдости по толщине азотированного слоя строили на основе измерений микротвёрдости по глубине с определённым шагом.

Результаты проведённых исследований

Фазовый анализ системы указывает на возможность образования в поверхностном слое азотированной стали нитридов железа. При относительно низких температурах азотирования поверхностный слой состоит преимущественно из ε-фазы Fe₂₋₃N, которая обеспечивает значительную твёрдость, но способствует охрупчиванию. Более высокие температуры азотирования и большая длительность процесса способствуют образованию γ'-фазы Fe₄N, которая сохраняет баланс между твёрдостью и вязкостью.

Исследования микроструктуры показали, что традиционное азотирование стали 38Х2МЮА в аммиаке при 540 °С формирует диффузионный слой на базе зоны внутреннего азотирования (рис. 2). В азотированном слое толщиной ~ 70 мкм выявляются игольчатые включения нитридов легирующих элементов.



Рис. 2. Микроструктура азотированного слоя в стали 38Х2МЮА:
а) общий вид; ×100; б) включения нитридов в зоне внутреннего азотирования; ×200

Fig. 2. Microstructure of the nitrated layer in 38Cr2MoAl steel:
a) general appearance; × 100; b) inclusions of nitrides in the zone of internal nitriding; ×200

Разбавление аммиака воздухом при стадийном азотировании меняет строение слоя: в нем образуется нитридная зона, толщина которой зависит от температуры и продолжительности процесса (рис. 3). Нитридная зона,

выделяющаяся на микрошлифах в виде белой нетравящейся полосы, обеспечивает повышение поверхностной твёрдости (рис. 4).

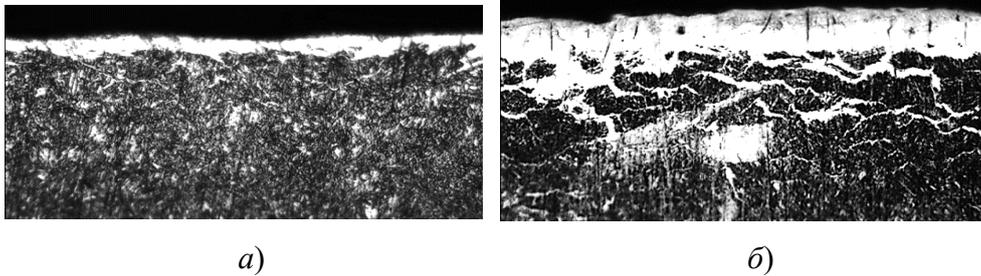


Рис. 3. Микроструктуры азотированного слоя в стали 40ХН2МА после стадийного азотирования при 560 °С в течение 10 ч (а) и 20 ч (б), $\times 500$

Fig. 3. Microstructures of the nitrated layer in 40CrNi2MoA steel after stage nitriding at 560 °C for 10 h (a) and 20 h (b), $\times 500$

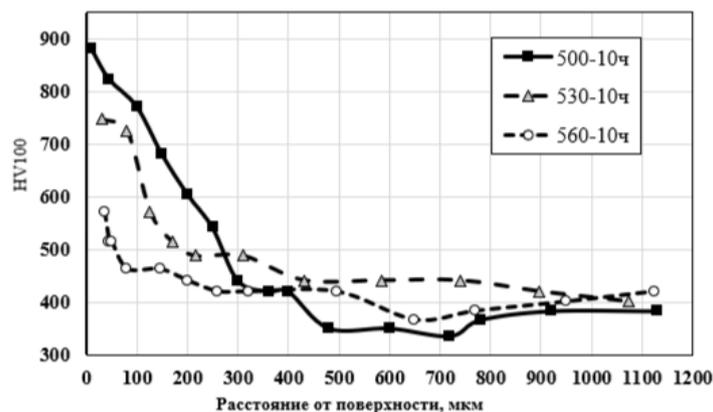


Рис. 4. Профили микротвёрдости стали 40ХН2МА после азотирования при разных температурах

Fig. 4. Microhardness profiles of steel 40CrNi2MoA after nitrogenization at different temperatures

Профили микротвёрдости по глубине слоя имеют заметный перепад, что связано как со снижением концентрации азота, так с изменениями в фазовом составе слоя.

Азотирование при относительно низких температурах приводит к наиболее высокой твёрдости слоя и резкому ее падению от поверхности к сердцевине. Этот твёрдый поверхностный слой благоприятен для износостойкости, но может оказаться слишком хрупким.

Наблюдаемые профили твёрдости коррелируют с фазами, присутствующими в системе железо-азот. Режимы, приводящие к преимущественному образованию ϵ -Fe₂-₃N, характеризуются более высокой твёрдостью, но также и большими градиентами твёрдости.

Напротив, условия, благоприятствующие образованию γ '-Fe₄N, приводят к более плавному перепаду твёрдости и потенциально лучшей вязкости.

Исследования ударной вязкости стали после традиционного азотирования в аммиаке показали, что она снижается в разы и практически не зависит от температуры испытаний (рис. 5). Рассчитанный по методике оценки доли вязкой составляющей порог хладноломкости неазотированной стали составляет - 70 °С [12], тогда как оценка по экспериментальной кривой на основе минимально допустимой вязкости (30 Дж/см²) даёт значение - 40 °С.

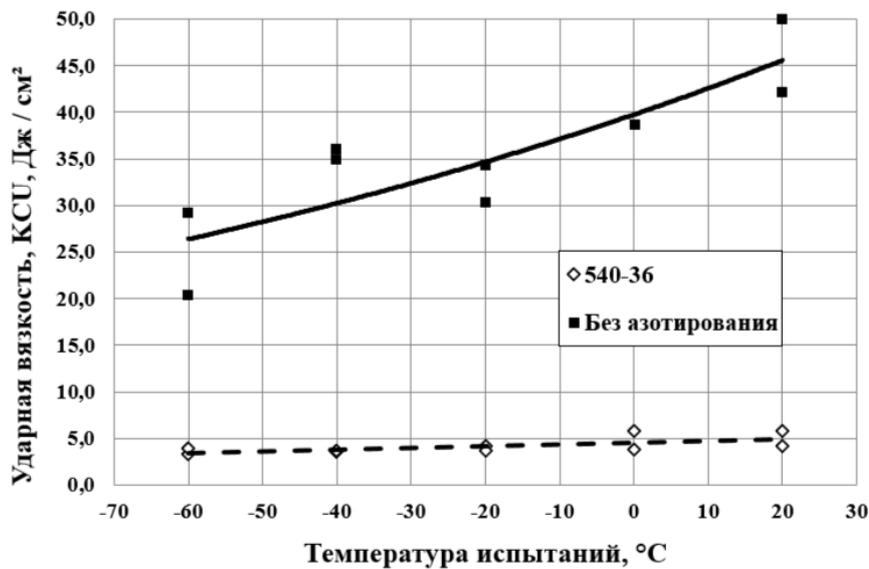


Рис. 5. Температурные зависимости ударной вязкости стали 38Х2МЮА без азотирования и после стандартного азотирования в аммиаке при 540 °С, 36 ч

Fig. 5. Temperature dependences of the impact strength of steel 38Cr2MoAl with no nitrogenization and after standard nitrogenization in ammonia at 540 °C, 36 h

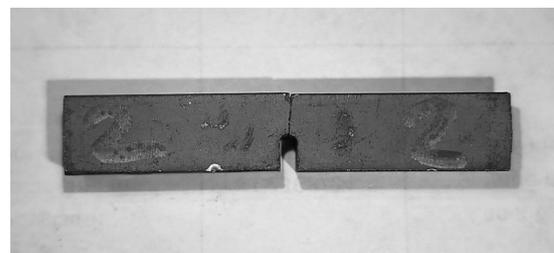
Параметры KCU азотированной стали падают до неприемлемых значений 3...5 Дж/см², что составляет 10...12 % от исходной вязкости при комнатной температуре. Изломы азотированной стали после испытаний при всех температурах имеют строение, характерное для межкристаллитного хрупкого разрушения, а ответные части разрушенных по такому механизму образцов точно совмещаются (рис. 6). Сильное охрупчивающее действие традиционного азотирования объясняется выделением в диффузионном слое нитридов легирующих элементов игольчатой формы (рис. 3).

Результаты испытаний показали, что ударная вязкость стали 40ХН2МА в исходном

состоянии после типовой термообработки в существенно меньшей степени подвержена негативному влиянию отрицательных температур, чем сталь 38Х2МЮА. При температуре -60 °С значение KCU у стали 40ХН2МА (~36 Дж/см²) существенно выше, чем у 38Х2МЮА (~26 Дж/см²). В изломе стали после испытаний имеются признаки вязкого разрушения и пластической деформации (рис. 7). Температурная кривая ударной вязкости имеет пологий вид (рис. 8), что говорит о слабом влиянии отрицательных температур. Эти преимущества можно напрямую связать с наличием в стали 40ХН2МА никеля, понижающего порог хладноломкости.



а)



б)

Рис. 6. Излом образца азотированной стали 38Х2МЮА после испытаний на ударный изгиб при комнатной температуре (а) и вид разрушенного образца (б)

Fig. 6. Fracture of a sample of nitrated steel 38Cr2MoAl after impact bending tests at room temperature (a) and a view of the destroyed sample (b)

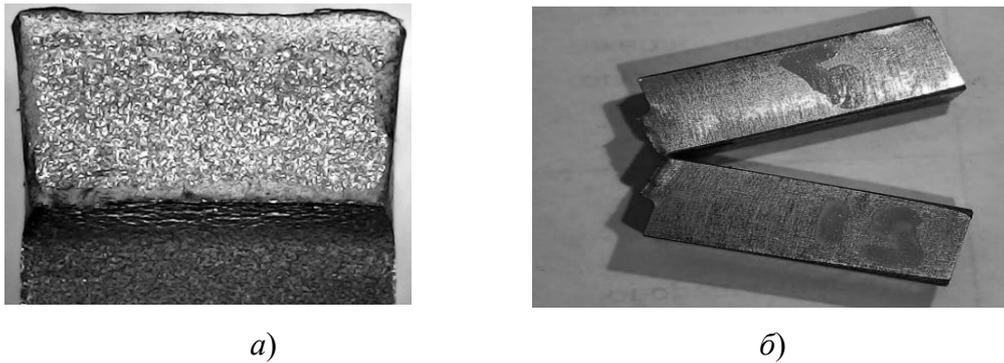


Рис. 7. Излом образца неазотированной стали 40ХН2МА после испытаний на ударный изгиб при температуре -60 °С (а) и вид разрушенного образца (б)

Fig. 7. Fracture of a sample of 40CrNi2MoA non-carbon steel after impact bending tests at a temperature of -60 °C (a) and the type of destroyed sample (b)

Стадийное азотирование стали 40ХН2МА позволяет сохранить гораздо более высокую ударную вязкость, чем традиционное газовое азотирование классического нитраллоя. Для оценки охрупчивающего влияния азотирования был введён параметр относительной вязкости $KCU_{аз}/KCU_{исх}$, выраженный в процентах. После стадийного азотирования этот параметр составляет при разных температурах испытаний 60...90 % в зависимости от температуры и продолжительности азотирования. В наибольшей степени сохраняет ударную вязкость стали при комнатной температуре процесс азотирования в режиме 560 °С, 10 ч (рис. 8). Однако вязкость

стали при этом резко падает с понижением температуры испытаний.

После азотирования при более низкой температуре 530 °С характер изменения вязкости с понижением температуры испытаний гораздо более плавный (рис. 8), т.е. азотированная по этому режиму сталь оказывается менее чувствительной к действию отрицательных температур. Ударная вязкость сохраняется выше критического значения (30 Дж/см²) вплоть до -50 °С. Ударная вязкость во всем диапазоне температур испытаний сохраняется на 83...85 % от вязкости неазотированной стали.

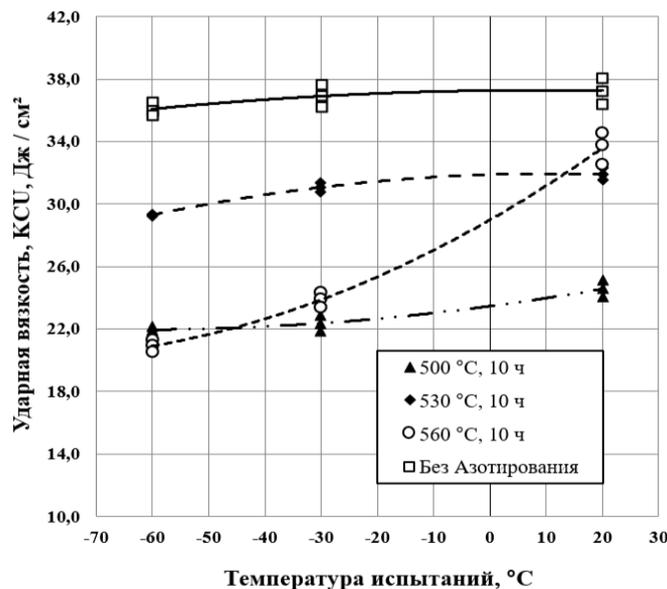


Рис. 8. Температурные зависимости ударной вязкости стали 40ХН2МА без азотирования и после стадийного азотирования при разных температурах, 10 ч

Fig. 8. Temperature dependences of the impact strength of 40CrNi2MoA steel with no nitrogenization and after stage nitrogen hardening process at different temperatures, 10 h

Для температуры азотирования 500 °С результаты по ударной вязкости менее удовлетворительные: значения KCU не превышают 22...24,5 Дж/см² (табл. 3). Но даже в этом

случае ударная вязкость в разы выше по сравнению с вязкостью стали после традиционного азотирования в аммиаке.

3. Ударная вязкость азотированной стали 40ХН2МА при различных температурах испытаний, KCU , Дж/см²

3. Impact strength of nitrided steel 40CrNi2MoA at various test temperatures, KCU , J/cm²

t, °С	Без азотирования	Режимы азотирования (температура, продолжительность)					
		500, 10	500, 20	530, 10	530, 20	560, 10	560, 20
+ 20	35,25	22, 57	23, 02	24, 89	25, 51	31, 52	24, 12
- 60	35,98	23, 96	14, 59	25, 30	20, 95	20, 91	23, 08

Обнаружена общая для всех режимов азотирования закономерность, что увеличение продолжительности процесса от 10 до 20 ч приводит к падению ударной вязкости стали и усиливает негативный эффект низких температур (табл. 3). Это объясняется спецификой строения азотированного слоя, полученного при разных режимах азотирования. Увеличение продолжительности азотирования приводит к росту нитридной зоны и образованию нитридных «усов» по границам зёрен (рис. 3, б), этим и объясняется увеличение хрупкости. Поэтому оптимальными для сохранения вязкости являются слои с нитридной зоной минимальной толщины.

В результате проведённых исследований построена диаграмма для выбора рациональных режимов стадийного азотирования стали 40ХН2МА для работы при комнатной температуре и при отрицательных температурах вплоть до - 60 °С на основе максимально возможного сохранения ударной вязкости (рис. 9). Из диаграммы видно, что для работы при комнатной температуре наиболее рациональным является стадийное азотирование при 560 °С в течение 10 ч, тогда как при отрицательных температурах вплоть до - 60 °С предпочтительно азотирование при более низкой температуре 530 °С.

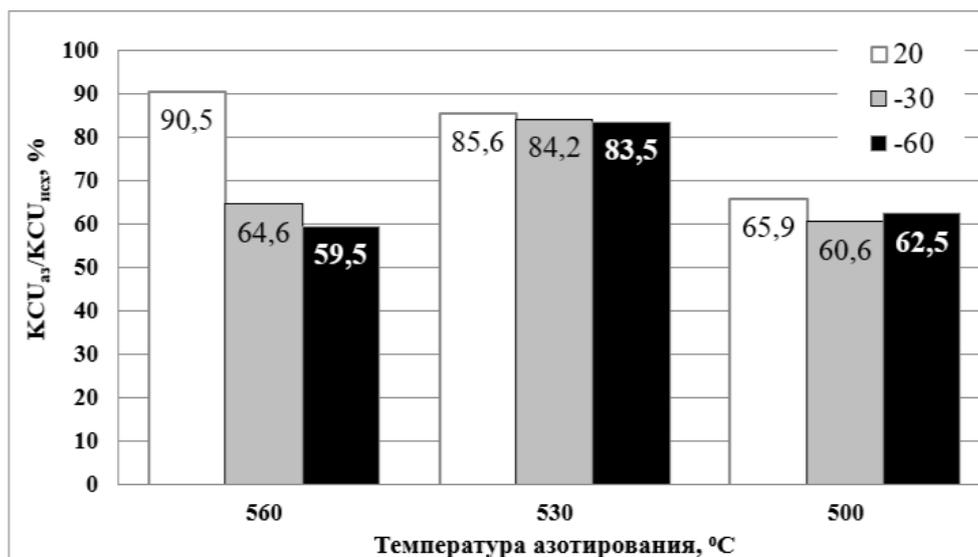


Рис. 9. Диаграмма выбора рациональных режимов стадийного азотирования стали 40ХН2М

Fig. 9. Diagram of the choice of rational modes of stage nitrogen hardening for 40CrNi2MoA steel

Заключение

Исследование показало, что условия азотирования существенно влияют на структуру и свойства среднеуглеродистых легированных сталей: микротвёрдость и ударную вязкость. Для обеспечения наилучшего баланса твёрдости и вязкости предлагаются процессы стадийного азотирования с чередованием насыщения в смеси аммиака и воздуха. Установлены закономерности влияния температуры и продолжительности стадийного азотирования на ударную вязкость и характер разрушения стали во взаимосвязи с особенностями строения азотированного слоя.

Наибольшее упрочнение азотированного слоя в виде повышения микротвёрдости достигается при менее высоких температурах азотирования, когда образуется поверхностная нитридная зона в виде ϵ -фазы. Ударная вязкость, наоборот, в наибольшей степени сохраняется при более высоких температурах азотирования и при небольшой длительности процесса, что связано с уменьшением толщины нитридной зоны и изменением ее состава.

В качестве критерия стойкости азотированных сталей к хрупкому разрушению выбран показатель относительной ударной вязкости по отношению к вязкости неазотированной стали. Предложены рекомендации по режимам азотирования с наибольшим показателем сохранности вязкости при комнатной температуре (более 90 %) и при отрицательных температурах (83...85 %). Полученные результаты могут быть применены для оптимизации процессов азотирования с целью повышения эксплуатационных характеристик легированных сталей в различных условиях эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г.Й., Бемер З. Теория и технология азотирования. М.: Металлургия, 1991. 320 с.
2. Zhang L., Wang M. The Effect of Nitriding on the Mechanical Properties of Alloy Steels. Journal of Materials Science and Technology, vol. 28. no. 5. 2012. pp. 436–441.

3. Хлусова Е.И., Сыч О.В. Создание хладостойких конструкционных материалов для Арктики. История, опыт, современное состояние. Инновации. 2018. № 1 (241). С. 85–92.

4. Белашова И.С., Петрова Л.Г., Фролов М.А. Влияние способов обработки конструкционных сталей на их охрупчивание в условиях климатического холода. Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXIX Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова, Кремёнки, 15–19 мая 2023 года. М.: ООО «ТРП», 2023. С. 59–60.

5. Wang Y. Cold Brittleness of Nitrided Alloy Steels. Experimental Observation. Materials Science and Engineering A., vol. 539. 2012. pp. 259–266.

6. Zhang W., Yan W., Sha W. The impact toughness of a nitride-strengthened martensitic heat resistant steel, Sci. China Technol. Sci., 2012. pp. 1858–62.

7. Алексеева Г.П., Банас И.П., Белякова В.И. Стали для зубчатых передач и деталей топливной аппаратуры, упрочняемых химико-термической обработкой // Авиационная промышленность. 1982. № 8. С. 31–32.

8. Петрова Л.Г., Белашова И.С., Бибииков П.С., Прокофьев М.В. Влияние стадийного азотирования на строение и свойства мартенситной стали 13X11H2B2MФ // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2021. № 12 (126). С. 12–19.

9. Петрова Л.Г., Белашова И.С. Газоциклические процессы химико-термической обработки: регулирование строения азотированного слоя в железе и сталях // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 7 (157). С. 3–14.

10. ГОСТ 4543–2016. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. С. 53.

11. ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенных температурах. С. 12.

12. Петрова Л.Г., Белашова И.С., Демин П.Е., Фролов М.А. Оценка критической температуры перехода в хрупкое состояние конструкционных сталей, эксплуатирующихся в Арктическом регионе // Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. 2023. № 2 (7). С. 59–70.

REFERENCES

1. Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D., Shpis G.Y., Boehmer Z. Theory and technology of nitriding. Moscow: Metallurgiya, 1991. 320 p.
2. Zhang L., Wang M. The Effect of Nitriding on the Mechanical Properties of Alloy Steels. Journal of Materials Science and Technology, vol. 28. no. 5. 2012. pp. 436–441.

3. Khlusova E.I., Sych O.V. Creation of cold-resistant structural materials for the Arctic. History, experience, current state. *Innovation*. 2018. no. 1 (241), pp. 85–92.

4. Belashova I.S., Petrova L.G., Frolov M.A. The influence of structural steel treatment technique on their embrittlement under climatic cold conditions. Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continuous media: Proceedings of the XXIX-th International Symposium named after A.G. Gorshkov, Kremenki, May 15–19, 2023. Moscow: LLC «TRP», 2023. pp. 59–60.

5. Wang Y. Cold Brittleness of Nitrided Alloy Steels - Experimental Observation. *Materials Science and Engineering A.*, vol. 539. 2012. pp. 259–266.

6. Zhang W., Yan W., Sha W. The impact toughness of a nitride-strengthened martensitic heat resistant steel, *Sci. China Technol. Sci.*, 2012. pp. 1858–62.

7. Alekseeva G.P., Banas I.P., Belyakova V.I. Steels for gears and fuel apparatus parts hardened by chemical heat treatment // *Aviatsionnaya Promyshlennost'*, 1982. no. 8. pp. 31–32.

8. Petrova L.G., Balashova I.S., Bibikov P.S., Prokofiev M.V. The effect of stadial nitrogenization on the structure and properties of martensitic steel 13X11N2V2MF // *Science-intensive technologies in mechanical engineering*, 2021. vol. 2021, no. 12 (126), pp. 12–19.

9. Petrova L.G., Belashova I.S. Gas-cycling processes of chemical and Thermal treatment: regulation of the structure of the nitrided layer in iron and steels // *Science-intensive technologies in mechanical engineering*. 2024, no. 7 (157), pp. 3–14.

10. State Standard (GOST) 4543-2016. Metal products made of structural alloy steel. p. 53.

11. State Standard (GOST) 9454-78. Metals. Test method for impact bending at low, room and elevated temperatures. p. 12.

12. Petrova L.G., Belashova I.S., Demin P.E., Frolov M.A. Assessment of the critical temperature of transition to a brittle state of structural steels used in the Arctic region // *Problems of expertise in the automotive and road industry*. 2023. no. 2 (7). pp. 59–70.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.07.2025; одобрена после рецензирования 17.07.2025; принята к публикации 21.08.2025.

The article was submitted 14.07.2025; approved after reviewing 17.07.2025; assepted for publication 21.08.2025.