

Научная статья

УДК 620.1

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31305>



*Р.В. Кузнецов*¹ ✉, *В.Г. Теплухин*¹, *Е.О. Ольховик*²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург, Россия

✉ Spaun1605@rambler.ru

К ВОПРОСУ УПРОЧНЕНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Аннотация. В данном исследовании приведены результаты сравнительного анализа свойств азотированных слоев, полученных в результате газового и ионного азотирования конструкционных легированных сталей, применяемых для изготовления ответственных, высоконагруженных деталей судовых дизелей. В работе проведено сравнительное исследование износостойкости, усталостной прочности и кавитационной стойкости легированных сталей после газового и ионного азотирования; показано преимущество последнего способа по данным характеристикам. Исследовано распределение остаточных напряжений после газового и ионного азотирования. Разработан технологический процесс ионного азотирования деталей судовых дизелей из сталей 38ХА, 38Х2МЮА и 18Х2Н4МА, который имеет преимущества по сравнению с классическими технологиями химико-термической обработки поверхности упрочняемых деталей.

Ключевые слова: дизель, ионное азотирование, износостойкость, усталостная прочность, кавитационная стойкость, легированная сталь.

Для цитирования:

Кузнецов Р.В., Теплухин В.Г., Ольховик Е.О. К вопросу упрочнения высоконагруженных деталей, работающих в узлах трения судовых дизелей // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 3. С. 74–85. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31305>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31305>*R.V. Kuznetsov*¹ ✉, *V.G. Teplukhin*¹, *E.O. Olkhovik*²¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;² Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russia✉ Spaun1605@rambler.ru

ON STRENGTHENING METHODS FOR HIGHLY LOADED COMPONENTS OPERATING IN FRICTION UNITS OF MARINE DIESEL ENGINES

Abstract. This study presents the results of a comparative analysis of the properties of nitrided layers obtained by gas and ion nitriding of structural alloy steels used to manufacture critical, highly loaded parts of marine diesel engines. The paper presents a comparative study of wear resistance, fatigue strength and cavitation resistance of alloy steels after gas and ion nitriding; the advantage of the latter method in terms of these characteristics is shown. The distribution of residual stresses after gas and ion nitriding is studied. A technological process for ion nitriding of marine diesel engine parts made of 38CrAl, 38Cr2MoUAl and 18Cr2Ni4MoAl steels has been developed, which has advantages over classical technologies of chemical-thermal treatment of the surface of the parts being strengthened.

Keywords: diesel, ion nitriding, wear resistance, fatigue strength, cavitation resistance, alloy steel.

Citation:

Kuznetsov R.V., Teplukhin V.G., Olkhovik E.O., On strengthening methods for highly loaded components operating in friction units of marine diesel engines, *Global Energy*, 31 (03) (2025) 74–85, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31305>

Введение. Темпы роста отечественного машиностроительного производства диктуют необходимость пересмотра серийных процессов в пользу более современных технологических решений [1–3]. При этом ключевым показателем конкурентоспособности предприятий становится ритмичность выпуска продукции с соответствующим повышением ее качества и надежности. Решение данной задачи в условиях реального серийного производства, как правило, ограничивается отсутствием достаточной научно-технической базы, необходимой для внедрения современных материалов и технологий. Традиционно при изготовлении высоконагруженных деталей из легированных инструментальных сталей прибегают к дополнительному поверхностному упрочнению путем химико-термической обработки – азотирования и цементации [4–6]. Если последняя практически безальтернативно подразумевает применение теплового нагрева в среде газа, то технология азотирования сегодня может быть реализована несколькими способами, наиболее перспективным из которых можно считать ионно-плазменную обработку. Особенность данного метода упрочнения заключается в низкотемпературном (480–550°C) воздействии ионов азота на поверхность металла в плазме тлеющего разряда, что позволяет получать поверхностно упрочненный слой заданного фазового состава в максимально короткие сроки [6–9].

Однако информация о влиянии выбранного способа азотирования конструкционных легированных сталей на функциональные и специальные конечные свойства полученных изделий на сегодняшний день подробно не исследована [10, 11].

Целью данной работы является изучение влияния способа диффузионного упрочнения сталей 38X2MЮА, 18X2Н4МА и 38ХА на их износостойкость, усталостную прочность и кавитационную

стойкость после газового и ионного азотирования, а также исследование распределения остаточных напряжений после проведения поверхностного упрочнения.

Материалы и методы исследования

В качестве материала исследования использовали горячекатаные заготовки диаметром 30÷50 мм из сталей 38Х2МЮА, 18Х2Н4МА и 38ХА. Перед азотированием мерные заготовки подвергали улучшению на твердость HRCэ 37÷30 единиц путем термической обработки.

Газовое азотирование проводили в камерных электрических печах периодического действия, ионное – в установке ИОН-75 конструкции отечественной компании «Ионные Технологии».

Режимы азотирования и полученные результаты твердости и глубины азотированного слоя представлены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы азотирования, полученные значения твердости и глубины азотированного слоя в образцах из стали 38Х2МЮА, 18Х2Н4МА, 38ХА

Table 1

Nitriding modes, obtained values of hardness and depth of the nitrided layer in samples made of 38Cr2MoUAl, 18Cr2Ni4MoAl, 38CrAl steel

Сталь	Номер режима	Вид и температура азотирования	<i>h</i> , мм	HV
38Х2МЮА	1	Газовое (NH ₃), 520°С, 25ч + 540°, 45ч	0,57÷0,67	891÷966/870÷1018
	2	Ионное (NH ₃), 550°С, 7ч	0,26÷0,34	810÷857/824÷946
	3	Ионное (20 % NH ₃ + 80% N ₂), 550°С, 4ч	0,20÷0,31	891÷927/752÷858
18Х2Н4МА	4	Газовое (NH ₃), 490°С, 40ч	0,24÷0,36	677÷701/707÷724
	5	Ионное (NH ₃), 500°С, 7ч	0,24÷0,35	655÷677/673÷724
	6	Ионное (NH ₃), 550°С, 7ч	0,31÷0,36	603÷613/606÷707
38ХА	7	Газовое (NH ₃), 490°С, 12ч	0,18÷0,26	655÷677/642÷649
	8	Ионное (NH ₃), 550°С, 7ч	0,16÷0,30	644÷655/665÷690
	9	Ионное (NH ₃) 550°С, 5ч + (20% NH ₃ + 80% N ₂), 550°С, 2ч	0,16÷0,36	623÷644/620÷657

Обозначения: *h* – толщина азотированного слоя.

Примечания: 1. Ионное азотирование проводили при давлении 400 Па, газовое азотирование – при давлении 0,10 МПа. 2. В числителе дана твердость HV, определенная при нагрузке 50 Н, в знаменателе – при нагрузке 100 Н.

Критерии для оценки качества азотированного слоя выбирали исходя из требований, предъявляемых к азотируемым деталям отечественных серийных судовых дизелей [3, 4, 12]. Так, наряду с определением толщины, твердости и фазового состава азотированного слоя проводили испытания на выносливость и износостойкость, исследовали распределение остаточных напряжений в поверхностных слоях, оценивали степень хрупкости и кавитационную стойкость азотированных слоев.

Усталостные испытания проводили на гладких образцах диаметром 5,97 мм и на образцах с кольцевым надрезом глубиной 0,75 мм с радиусом закругления во впадине 0,2 мм и углом раскрытия 60° [13]. Теоретический коэффициент концентрации напряжений такого надреза $K = 4,88$.

Испытания на усталостную прочность проводили на машине МУИ-6000, обеспечивающей чистый изгиб при вращении, на базе $N = 10^7$ циклов.

Испытания на изнашивание и контактную прочность проводили на машине МИ-1М [14, 15] при трении качения с удельным проскальзыванием $\delta = 15\%$ на роликах диаметром 28,6 мм по следующей методике: два ролика одновременно вращались в разные стороны с частотой 425 и 360 об/мин. Образцы испытывали за 6 этапов, с увеличением нагрузки от одного к другому. Максимальные контактные напряжения варьировали от 350 до 800 Н/мм². Образцы находились под действием каждой последующей нагрузки в течение 40 ч, по окончании этапа определяли износ образцов по уменьшению их массы. В качестве смазки при испытаниях использовали масло МС20 (ГОСТ 21743-21).

Хрупкость азотированного слоя оценивали по результатам испытаний на изгиб под нагрузкой [16], приложенной к центру азотированной с двух сторон пластины размером $2 \times 10 \times 100$ мм. Расстояние между опорами составило 70 мм. В процессе испытаний измеряли стрелу прогиба (f), соответствующую максимальной контактной нагрузке. Измерение остаточных напряжений первого рода, а также рентгеноструктурный фазовый анализ по толщине упрочненного слоя проводили на стационарном рентгеновском дифрактометре в хромовом K_{α} -излучении после послойного электрополирования образцов размером $3 \times 6 \times 10$ мм. Методика определения остаточных напряжений основана на прецизионном измерении смещения дифракционных линий [17]. Напряжения рассчитывали по формуле:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{(\varepsilon_{\psi 2\varphi} - \varepsilon_{\psi 1\varphi})}{\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1},$$

где E – модуль нормальной упругости; μ – коэффициент Пуассона; $\varepsilon_{\psi\varphi} = (d_{\psi\varphi} - d_0)/d_0$ (здесь d_0 – исходное межплоскостное расстояние; $d_{\psi\varphi}$ – межплоскостное расстояние в направлении ψ , φ).

Испытания на кавитационную стойкость производились на установке, разработанной ЦНИ-ИМФ, по режиму: частота колебаний – 8000 Гц, амплитуда колебаний – 0,065 мм, время – 3 ч, среда – вода (невская), температура среды – $17 \div 20^{\circ}\text{C}$. Оценка результатов кавитационной стойкости образцов производилась по потере веса образца после каждого часа испытаний [18].

Результаты исследований

Как следует из приведенных в табл. 1 результатов, толщина и твердость азотированного слоя на сталях 18Х2Н4МА и 38ХА после газового и ионного азотирования по исследованным режимам примерно одинаковы. Однако при этом продолжительность ионного азотирования для сталей 18Х2Н4МА и 38ХА меньше в 6 и 2 раза соответственно, чем газового. Для стали 38Х2МЮА при одинаковом уровне твердости толщина слоя после ионного азотирования примерно в 2 раза меньше, чем после газового. Однако следует учитывать, что длительность процесса при ионном азотировании также значительно меньше, чем при газовом.

Как показали анализ многочисленных работ отечественных и зарубежных исследователей, а также полученные нами результаты, ионное азотирование эффективно только в случае получения азотированного слоя небольшой толщины – не более 0,3 мм [6, 9, 10]. При азотировании на большую толщину преимущества ионного азотирования по сравнению с газовым теряются: длительность выдержки практически становится одинаковой при обоих процессах, так как при азотировании на толщину более 0,3 мм определяющим фактором ускорения насыщения становятся не процессы, связанные с активацией поверхности азотируемой детали (увеличение плотности дефектов), а процессы диффузии в металле, которые в основном зависят от температуры и длительности выдержки и протекают практически одинаково как при ионном азотировании, так и при газовом. Твердость азотированного слоя на сталях 18Х2Н4МА и 38ХА при ионном и газовом азотировании по исследуемым режимам имеет близкие значения (HV 824÷946).

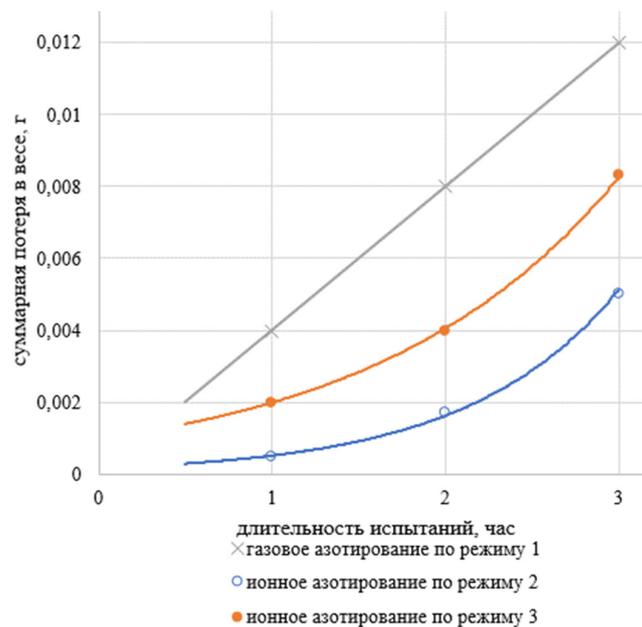


Рис. 1. Потеря массы азотированных образцов из стали 38Х2МЮА в процессе кавитационных испытаний: газовое азотирование по режиму 1, ионное азотирование по режиму 2, ионное азотирование по режиму 3

Fig. 1. Weight loss of nitrided samples made of 38Cr2MoUAl steel during cavitation tests:

a – gas nitriding according to mode 1; b – ion nitriding according to mode 2; c – ion nitriding according to mode 3

Анализ результатов испытаний на изгиб азотированных пластин показал, что максимальные напряжения изгиба (σ_u) при газовом азотировании стали 38Х2МЮА соответствует 1150 Н/мм², а при ионном азотировании – 2000 Н/мм²; стрела прогиба f , зафиксированная при максимальной нагрузке азотированных пластин, равна 5 и 8 мм соответственно. Для стали 18Х2Н4МА также получены более высокие значения максимального напряжения и стрелы прогиба после ионного азотирования по сравнению с газовым (σ_u равно 2400 и 1800 Н/мм²; f равна 9÷12 и 7 мм соответственно).

Полученные данные свидетельствуют о более высокой хрупкости азотированного слоя при газовом азотировании по сравнению с ионным. По данным рентгеноструктурного фазового анализа, после ионного азотирования поверхностный слой толщиной 20÷45 мкм состоит из гомогенной зоны нитридных соединений (γ' -фаза Fe₄N) и диффузионной зоны, содержащей азотный феррит и нитриды легирующих элементов. После газового азотирования в поверхностной нитридной зоне наряду с γ' -фазой образуется ϵ -фаза (Fe₂₋₃N), что приводит к получению слоя с более высокой хрупкостью и твердостью, чем после ионного азотирования.

Результаты исследования выносливости гладких образцов и образцов с надрезом из сталей 38Х2МЮА, 18Х2Н4МА и 38ХА представлены на рис. 1–3. Здесь видно, что после ионного азотирования предел выносливости сталей 38ХА, 38Х2МЮА примерно на 5%, а стали 18Х2Н4МА – на 7% выше, чем после газового азотирования.

Характерно, что долговечность сталей в области ограниченной выносливости во всех случаях выше после газового азотирования. Установлено (рис. 1–3), что образцы с надрезом всех исследованных сталей после ионного азотирования по оптимальному режиму имеют более высокий предел выносливости, чем после газового азотирования. Особенно высокий эффект повышения предела выносливости при ионном азотировании получен для стали 38ХА ($\sigma_{-1к}$ равно 400 и 280 Н/мм² после ионного и газового азотирования соответственно).

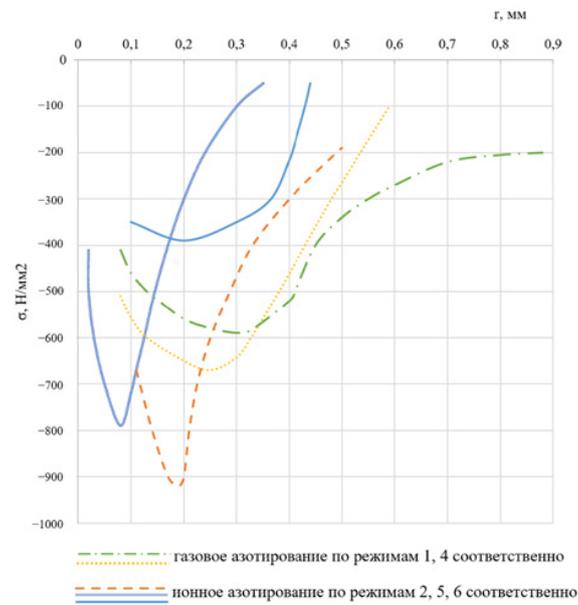


Рис. 2. Эпюры распределения остаточных напряжений по толщине азотированного слоя (r – расстояние от поверхности образца) сталей 38X2MЮА (обозначение: желтые точки и оранжевый пунктир) и 18X2H4MA (обозначение: зеленые тире с точками, голубая и синяя линии)

Fig. 2. Distribution diagrams of residual stresses across the thickness of the nitrided layer (r is the distance from the sample surface) of 38Cr2MoUAl (designation: yellow dots and orange dashed line) and 18Cr2Ni4MoAl (designation: green dashes with dots, light blue and blue lines) steels

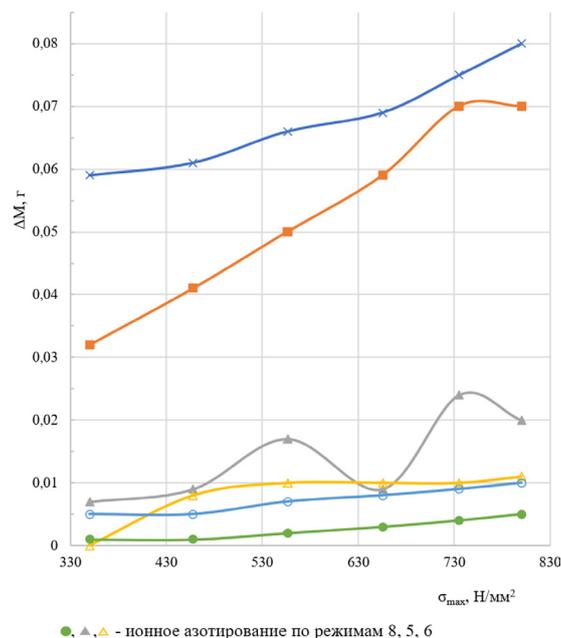


Рис. 3. Изменение массы азотированных роликов из сталей 38X2MЮА (обозначение: линии с крестиком, голубым и зеленым кружками) и 18X2H4MA (обозначение: линии с оранжевым квадратом, желтым и серым треугольниками) в зависимости от контактных напряжений при испытаниях на изнашивание

Fig. 3. Change in the mass of nitrided rollers made of 38Cr2MoUAl (designation: lines with a cross, blue and green circles) and 18Cr2Ni4MoAl (designation: lines with an orange square, yellow and gray triangles) steels depending on contact stresses during wear tests

Обсуждение

Известно, что влияние поверхностной обработки на предел выносливости конструкционных сталей связан в значительной степени с распределением остаточных напряжений [17, 19], изменяющих асимметрию цикла и сдвигающих область нагрузки на полной диаграмме предельных напряжений к средним сжимающим или средним растягивающим напряжениям.

Эпюры распределения остаточных напряжений сталей 18X2H4MA и 38X2MЮA после азотирования по исследованным режимам показаны на рис. 4. Видно, что на поверхности образцов во всех случаях возникают сжимающие напряжения: при этом после ионного азотирования сжимающие остаточные напряжения располагаются в более тонком поверхностном слое, что связано с меньшей толщиной диффузионного насыщения. Максимум сжимающих напряжений после ионного азотирования больше по абсолютной величине и находится ближе к поверхности, чем после газового азотирования, т.е. создается «кольцо сжимающих напряжений».

По эпюрам распределения остаточных напряжений в азотированном слое можно было бы предположить значительные различия в пределах выносливости гладких образцов после газового и ионного азотирования. Однако в данном исследовании практически не наблюдалось такого различия для гладких образцов, и только при испытаниях на усталость образцов с надрезом установлено значительное повышение предела выносливости исследованных сталей после ионного азотирования. Это несоответствие можно объяснить, по-видимому, тем, что в более пластичном материале, каким является азотированный слой после ионного азотирования (по данным испытаний азотированных пластин на хрупкость), остаточные напряжения релаксируют быстрее в процессе циклических нагружений, чем в слое, полученном при газовом азотировании. На образцах с надрезом пластическая деформация в связи с локализацией напряжений в районе концентратора затруднена, и эффект от действия более высоких остаточных напряжений, возникающих при ионном азотировании, проявляется сильнее.

В результате испытаний на изнашивание установлено (рис. 5), что более высокой износостойкостью обладают ролики после ионного азотирования. При этом суммарное уменьшение массы роликов из стали 38X2MЮA после газового азотирования в 7–8 раз больше, чем после ионного азотирования. Такая же закономерность наблюдается и при испытании роликов из стали 18X2H4MA.

Полученные результаты подтверждают данные работы [15], где при оценке влияния фазового состава нитридной зоны на износостойкость сталей отмечается, что γ' -фаза (Fe_4N) обладает более высокими антифрикционными свойствами, чем ϵ -фаза ($Fe_{2-3}N$).

Кавитационным испытаниям подвергались образцы из стали 38X2MЮA после газового и ионного азотирования по режимам 2 и 3.

Из приведенных на рис. 6 данных следует, что образцы из стали 38X2MЮA после ионного азотирования имеют более высокую кавитационную стойкость, чем после газового азотирования.

Состояние азотированной поверхности всех исследованных образцов в зоне интенсивной кавитации удовлетворительное, очагов кавитационного разрушения не наблюдается.

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что ионное азотирование наряду с рядом технологических преимуществ позволяет получить на поверхности стальных деталей упрочненные слои с более высоким комплексом свойств, чем газовое, и тем самым позволяет повысить эксплуатационные характеристики деталей дизелей из сталей 38XA, 38X2MЮA и 18X2H4MA.

Заключение

Полученные результаты дают возможность выполнить достаточно объективное сравнение двух технологий – газового и ионного азотирования – по нескольким параметрам, которые определяют конечные физико-механические свойства упрочняемых легированных сталей.

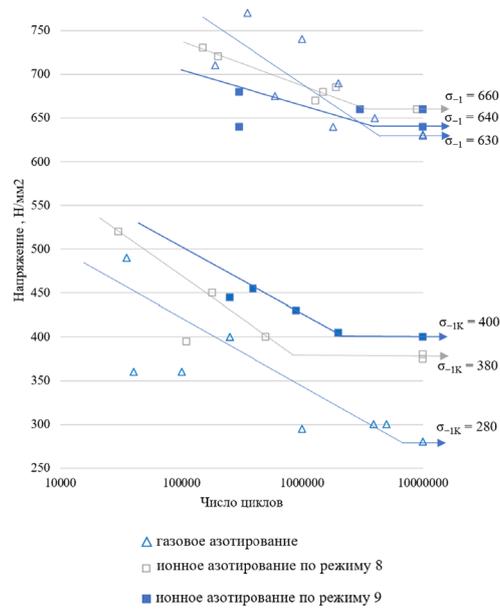


Рис. 4. Усталостные кривые стали 38ХА

Fig. 4. Fatigue curves of 38CrAl steel

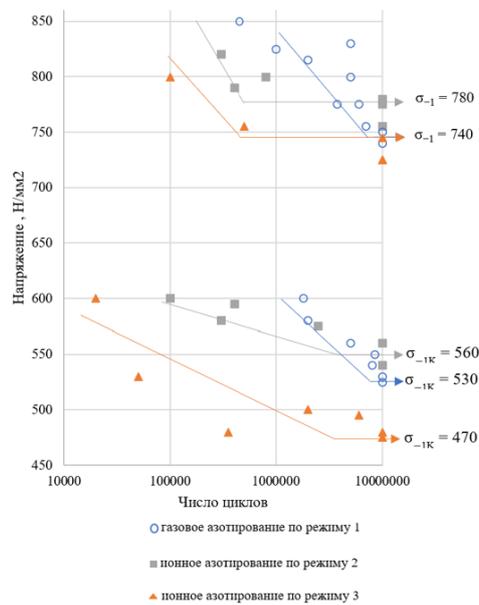


Рис. 5. Усталостные кривые стали 38Х2МЮА

Fig. 5. Fatigue curves of 38Cr2MoUAl steel

1. Выполнен анализ свойств азотированных слоев конструкционных легированных сталей 38ХА, 38Х2МЮА и 18Х2Н4МА, полученных в результате использования двух различных технологий: газового и ионного азотирования. Рассматриваются особенности применения технологий.

2. Разработан процесс ионного азотирования деталей дизелей из сталей 38ХА, 38Х2МЮА и 18Х2Н4МА, который имеет преимущества по сравнению с классическими технологиями химико-термической обработки поверхности упрочняемых деталей.

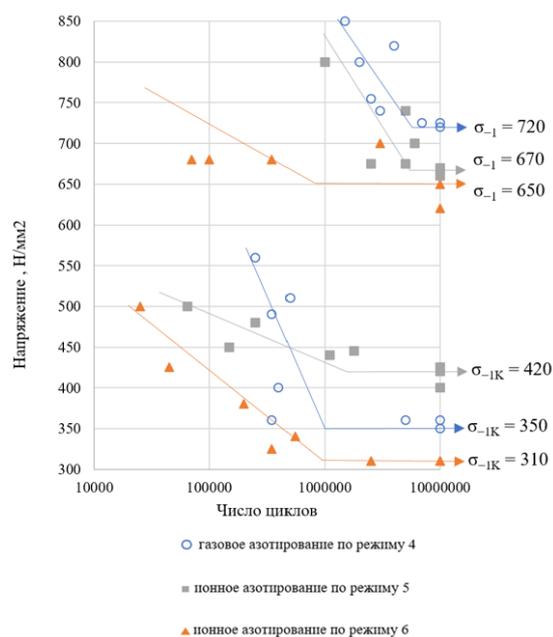


Рис. 6. Усталостные кривые стали 38Х2МЮА

Fig. 6. Fatigue curves of 38Cr2MoUAl steel

3. Проведено сравнительное исследование износостойкости, усталостной прочности и кавитационной стойкости легированных сталей 38ХА, 38Х2МЮА и 18Х2Н4МА после газового и ионного азотирования; показано преимущество последнего способа по этим характеристикам.

4. Исследовано распределение остаточных напряжений после газового и ионного азотирования образцов стали.

5. Выявлены значительные различия в физическом механизме формирования поверхностных механических свойств после газового и ионного азотирования, что объясняет отличия ряда конечных характеристик.

6. Сочетание технологий газового и ионного азотирования позволит направленно формировать заданные (необходимые) механические свойства поверхности рассматриваемых легированных сталей под определенные условия эксплуатации деталей.

7. Внедрение технологического процесса на производстве позволило: сократить длительность процесса по сравнению с газовым азотированием в 2–2,5 раза; улучшить воздушную атмосферу в цехе; сократить расходы аммиака; улучшить качество азотированного слоя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Кузнецов Р.В., Кузнецов П.А. Исследование влияния газодинамического напыления промежуточного слоя на прочность соединения биметаллических материалов // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 13-й Международной научной конференции. 2024. С. 737–747. DOI: <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id24-134>

[2] Kuznetsov R., Ol'khovik E., Palagushkin B. Investigation of the causes of inlet valve destruction of forced marine engines, AIP Conference Proceedings, 2647 (1) (2022) 060014. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0104203>

[3] Хмелевская В.Б., Мосейко Е.С., Ольховик Е.О. Исследование упрочнения деталей судового валопровода методом покрытия плазменным напылением с ультразвуковой обработкой // Вестник

государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2013. № 3. С. 81–87.

[4] **Денисов А.С., Галиев Р.К., Кулаков А.Т.** Анализ эффективности эксплуатации азотированных коленчатых валов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. Т. 86, № 3. С. 41–46.

[5] **Скаков М.К., Батырбеков Э.Г., Ерыгина Л.А.** Влияние электролитно-плазменного азотирования на свойства поверхностного слоя стали 34ХН1М // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых. 2014. Ч. 3. С. 245–248.

[6] **Ozturk M., Husem F., Karademir I., Maleki E., Amanov A., Unal O.** Fatigue crack growth rate of AISI 4140 low alloy steel treated via shot peening and plasma nitriding, *Vacuum*, 207 (2023) 111552. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111552>

[7] **Taskan Z., Ozturk E., Tezcan S., Mindivan H.** Influence of plasma nitriding on tribological performance of HVOF sprayed AISI 316L and AISI 420 stainless steel coatings, *Tribology and Materials*, 3 (4) (2024) 187–196. DOI: <https://doi.org/10.46793/tribomat.2024.020>

[8] **Reddy C.A.K., Srinivasan T., Venkatesh B.** Effect of plasma nitriding on M50 NiL steel – A review, *Materials Today: Proceedings*, 52 (3) (2022) 1073–1077. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.494>

[9] **Wang G., Peng Y., Zhu Z., Chang X., Li C., Imran M., Wahab M.A.** Fretting wear behaviour of high strength alloy steel induced by plasma nitriding and post-oxidation, *Tribology International*, 196 (2024) 109732. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109732>

[10] **Жуков А.А., Хасанова Л.А.** Повышение эффективности процессов азотирования // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2012. № 183. С. 28–33.

[11] **Шевчук А.М., Негров Д.А., Путинцев В.Ю.** Влияние азотирования на структуру и свойства сталей // Техника и технологии машиностроения: материалы V Международной студенческой научно-практической конференции. 2016. С. 421–425.

[12] **Шеховцева Е.В.** Исследование микротвердости для обеспечения контактной выносливости конструкционных материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2024. Т. 90, № 9. С. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-9-48-53>

[13] **Кусков К.В., Сызранцева К.В.** Сравнение усталостных характеристик образцов различной геометрии из стали 09Г2С // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2024. Т. 26, № 2. С. 24–30. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2022.2.03>

[14] **Антипов П.Е. и др.** Сравнительный анализ износостойкости ионно-плазменных покрытий трибологического назначения // Актуальные проблемы науки и техники. 2024: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. 2024. С. 532.

[15] **Агафонов С.В., Беломестных В.А.** Испытания на износостойкость азотированной в электростатическом поле стали 38Х2МЮА // Вестник ИрГСХА. 2018. № 84. С. 136–142.

[16] **Гахраманов В.Ф.** Азотирование инструментальных сталей // *The Scientific Heritage*. 2021. № 62. С. 36–41.

[17] **Акуличев А.Г., Трофимов В.В.** Остаточные напряжения в нитроцементованной стали 20Х3М-ВФ-ш // Инженерный вестник Дона. 2010. Т. 14, № 4. С. 163–169.

[18] **Митяев А.А., Беликов С.Б., Повело В.И.** Повышение кавитационной стойкости вторичных силуминов // Литье и металлургия. 2007. Т. 43, № 3. С. 94–96.

[19] **Webster G.A., Ezeilo A.N.** Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes, *International Journal of Fatigue*, 23 (1) (2001) 375–383. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00133-5](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00133-5)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУЗНЕЦОВ Руслан Валерьевич – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: Spaun1605@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5670-8784>

ТЕПЛУХИН Василий Гельевич – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: cornfield@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0535-7899>

ОЛЬХОВИК Евгений Олегович – доцент, ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», канд. техн. наук.

E-mail: olhovick@gmail.com

REFERENCES

[1] **R.V. Kuznetsov, P.A. Kuznetsov**, Investigation of the influence of gas-dynamic spraying of an intermediate layer on the strength of bimetallic materials joints, Proceedings of the 13th International Scientific Conference, (2024) 737–747. DOI: <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id24-134>

[2] **R. Kuznetsov, E. Ol'khovik, B. Palagushkin**, Investigation of the causes of inlet valve destruction of forced marine engines, AIP Conference Proceedings, 2647 (1) (2022) 060014. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0104203>

[3] **V.B. Khmelevskaia, E.S. Moseiko, E.O. Ol'khovik**, Reseach of hardening of ship propeller shaft by plasma spraying coverage with ultrasonic treatment, Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova, 3 (2013) 81–87.

[4] **A.S. Denisov, R.K. Galiev, A.T. Kulakov**, Performance analysis of nitrided crankshafts, Vestnik of Saratov State Technical University, 3 (86) (2020) 41–46.

[5] **M.K. Skakov, E.G. Batyrbekov, L.A. Erygina**, Vliianie elektrolitno-plazmennogo azotirovaniia na svoistva poverkhnostnogo sloia stali 34KH1M [The influence of electrolytic plasma nitriding on the properties of the surface layer of 34XH1M steel], Elektrotehnika. Energetika. Mashinostroenie: sbornik nauchnykh trudov I Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh [Electrical engineering. Power engineering. Mechanical engineering: collection of scientific papers of the I International Scientific Conference of Young Scientists], 3 (2014) 245–248.

[6] **M. Ozturk, F. Husem, I. Karademir, E. Maleki, A. Amanov, O. Unal**, Fatigue crack growth rate of AISI 4140 low alloy steel treated via shot peening and plasma nitriding, Vacuum, 207 (2023) 111552. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111552>

[7] **Z. Taskan, E. Ozturk, S. Tezcan, H. Mindivan**, Influence of plasma nitriding on tribological performance of HVOF sprayed AISI 316L and AISI 420 stainless steel coatings, Tribology and Materials, 3 (4) (2024) 187–196. DOI: <https://doi.org/10.46793/tribomat.2024.020>

[8] **C.A.K. Reddy, T. Srinivasan, B. Venkatesh**, Effect of plasma nitriding on M50 NiL steel – A review, Materials Today: Proceedings, 52 (3) (2022) 1073–1077. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.494>

[9] **G. Wang, Y. Peng, Z. Zhu, X. Chang, C. Li, M. Imran, M.A. Wahab**, Fretting wear behaviour of high strength alloy steel induced by plasma nitriding and post-oxidation, Tribology International, 196 (2024) 109732. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109732>

[10] **A.A. Gukov, L.A. Khasanova**, The increase of nitriding processes effectiveness, Civil Aviation High Technologies, 183 (2012) 28–33.

- [11] **A.M. Shevchuk, D.A. Negrov, V.Iu. Putintsev**, Vliianie azotirovaniia na strukturu i svoistva stalei [The influence of nitriding on the structure and properties of steels], *Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniia: materialy V Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Engineering and technology of mechanical engineering: Proceedings of the V International Student Scientific and Practical Conference], (2016) 421–425.
- [12] **E.V. Shehovtseva**, Study of the microhardness ensuring the contact endurance of structural materials, *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 90 (9) (2024) 48–53. DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-9-48-53>
- [13] **K.V. Kuskov, K.V. Syzrantseva**, Comparison of fatigue characteristics of samples of different geometry from steel 09Mn2S, *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 26 (2) (2024) 24–30. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2024.2.03>
- [14] **P.E. Antipov et al.**, Sravnitel'nyi analiz iznosostoikosti ionno-plazmennyykh pokrytii tribologicheskogo naznacheniia [Comparative analysis of wear resistance of ion-plasma coatings for tribological purposes], *Aktual'nye problemy nauki i tekhniki. 2024: materialy Vserossiiskoi (natsional'noi) nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Current issues of science and technology. 2024: materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference], (2024) 532.
- [15] **S.V. Agafonov, V.A. Belomestnyh**, Wear resistance tests of nitrided in an electrostatic field of steel 38H2MYUA, *Vestnik IrGSHA*, 84 (2018) 136–142.
- [16] **V. Gahramanov**, Nitrogening tool steels, *The Scientific Heritage*, 62 (2021) 36–41.
- [17] **A.G. Akulichev, V.V. Trofimov**, Ostatochnye napriazheniia v nitrotsementovannoi stali 20KH3M-VF-sh [Residual stresses in nitrocarburized steel 20Kh3MVF-sh], *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 14 (4) (2010) 163–169.
- [18] **A.A. Mitiaev, S.B. Belikov, V.I. Povelov**, Povyshenie kavitatsionnoi stoikosti vtorichnykh siluminov [Increasing the cavitation resistance of secondary silumins], *Lit'e i metallurgiiia* [Foundry production and metallurgy], 43 (3) (2007) 94–96.
- [19] **G.A. Webster, A.N. Ezeilo**, Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes, *International Journal of Fatigue*, 23 (1) (2001) 375–383. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00133-5](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00133-5)

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Ruslan V. KUZNETSOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: Spaun1605@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5670-8784>

Vasilii G. TEPLUKHIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: cornfield@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0535-7899>

Evgeniy O. OLKHOVIK – *Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping.*

E-mail: olhovick@gmail.com

Поступила: 13.06.2025; Одобрена: 02.07.2025; Принята: 04.07.2025.

Submitted: 13.06.2025; Approved: 02.07.2025; Accepted: 04.07.2025.