

Цифровое проектирование ТВЧ-процессов с использованием искусственного интеллекта для повышения энергоэффективности и надежности буровых насосов

Габибов Ибрагим^{a,b,*}, Алиев Эльман^{a,**}, Маммадов Фарид^{a,***}

^aАзербайджанский Государственный университет нефти и промышленности,
г. Баку, AZ1010, Азербайджан

^bЗападно-Каспийский университет, г. Баку, 1001, Азербайджан

*e-mail: h.ibo@mail.ru

**e-mail: elmancam@gmail.com

***e-mail: faridrutul@mail.ru

Поступила в редакцию 07.01.2026

После доработки 13.04.2026

Принята к публикации 23.05.2026

Энергоэффективность и надежность буровых насосов являются ключевыми факторами стабильности нефтегазовой энергетики. Значительная доля эксплуатационных энергетических потерь связана с износом цилиндрических втулок и ростом трения в поршневой группе. В настоящем исследовании предложен подход к цифровому проектированию процессов поверхностной закалки токами высокой частоты (ТВЧ) с применением искусственного интеллекта для повышения энергоэффективности и долговечности буровых насосов типа УНБ-600 (У8-6МА2). Разработана интеллектуальная модель, объединяющая методы машинного обучения и нечеткой логики, для оптимизации режимов нагрева, скорости перемещения индуктора и параметров охлаждения с учетом нелинейных зависимостей между процессами упрочнения и энергетическими показателями оборудования. Результаты моделирования демонстрируют снижение коэффициента трения и износа на 30–35%, повышение твердости поверхностного слоя до 48–52 HRC и увеличение ресурса оборудования без роста энергозатрат. Внедрение цифрового проектирования ТВЧ-процессов позволяет уменьшить энергопотребление при обработке и эксплуатации узлов, снизить частоту ремонтов и обеспечить повышение надежности насосного оборудования в топливно-энергетическом комплексе. Интеграция искусственного интеллекта в технологические процессы открывает перспективы создания интеллектуальных систем управления жизненным циклом энергонагруженных деталей и сокращения энергетических потерь на этапе эксплуатации.

Ключевые слова: энергоэффективность, цифровое проектирование, ТВЧ-упрочнение, искусственный интеллект, нечеткая логика, буровой насос, цилиндрическая втулка, энергозатраты, трибологические свойства, надежность оборудования

УДК 621.785.6.048.7:004.89

<https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.4.82>

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность и надежность насосного оборудования в нефтегазовой промышленности во многом определяется состоянием цилиндрических втулок. В процессе эксплуатации они подвергаются воздействию высоких механических нагрузок, абразивного износа и коррозионных факторов. Традиционные методы упрочнения, такие как цементирование, азотирование или лазерная обработка, обладают рядом ограничений: высокой энергоемкостью, сложностью технологического контроля и ограниченной глубиной упрочненного слоя.

Перспективным направлением является применение токов высокой частоты (ТВЧ), позволяющих формировать поверхностный слой

с повышенной твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью при сохранении вязкой сердцевины материала. Однако эффективность ТВЧ-закалки во многом зависит от точного подбора технологических параметров – частоты, температуры, скорости перемещения индуктора и интенсивности охлаждения.

В последние годы в инженерных науках активно внедряются методы искусственного интеллекта (ИИ), включая машинное обучение и нечеткую логику. Их использование позволяет анализировать нелинейные взаимосвязи между параметрами процесса и свойствами материала, а также проводить цифровое проектирование технологических режимов. Это создает основу для разработки интеллектуальных систем

управления, обеспечивающих устойчивые результаты в условиях неопределенности.

Исследования последних десятилетий показывают, что методы ТВЧ-обработки широко применяются в машиностроении для повышения долговечности деталей, работающих в тяжелых условиях. По данным [1], использование индукционного нагрева позволяет увеличить твердость поверхностного слоя стальных образцов до 1,5–2 раз по сравнению с традиционной термообработкой. В работах [2] показано, что применение адаптивного управления режимами ТВЧ-закалки обеспечивает снижение коэффициента износа деталей на 25–30%.

Вместе с тем, традиционные аналитические методы часто не учитывают сложные нелинейные зависимости и вариативность эксплуатационных условий. Для решения этой проблемы все чаще применяются интеллектуальные подходы. Например, [3] продемонстрировали эффективность гибридных моделей, объединяющих нечеткую логику и искусственные нейронные сети для оптимизации процессов термообработки.

В других исследованиях [4, 5] подчеркивается значимость цифрового проектирования и машинного обучения для предсказания свойств материалов в условиях высокочастотного нагрева.

Таким образом, в научной литературе прослеживается тенденция интеграции ТВЧ-методов с ИИ-моделированием [6, 7]. Однако прикладные исследования, связанные с упрочнением цилиндрических втулок насосов для нефтегазовой отрасли, остаются ограниченными, что определяет актуальность настоящей работы.

МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные исследования проводились на специально разработанной установке для поверхностной закалки цилиндрических втулок насосов У8-6МА2 (см. рис. 1).

Устройство состоит из индукционного нагревателя высокой частоты (мощность 100 кВт, диапазон частот 5–15 кГц), обеспечивающий локальный нагрев внутренней поверхности цилиндра. Индуктор-душ с водяным охлаждением, установленный на подвижной каретке с регулируемой скоростью перемещения (5–15 мм/с). Систему автоматизированного контроля температуры нагрева (750–950 °С), скорости перемещения и расхода охлаждающей жидкости (0,5–1,2 л/с).

Методология исследования основана на интеграции цифрового проектирования ТВЧ-процессов и алгоритмов искусственного

интеллекта [8]. Сюда были включены следующие этапы:

1. Сбор и анализ данных. Использованы экспериментальные результаты по ТВЧ-закалке цилиндрических втулок из стали марок, применяемых для насосов У8-6МА2. Параметры включали: частоту нагрева (5–15 кГц), температуру (750–950 °С), скорость перемещения индуктора (5–15 мм/с), расход охлаждающей жидкости и время экспозиции.

2. Разработка интеллектуальной модели. Было построено гибридная система, объединяющая нечеткую логику для формализации экспертных знаний и учета неопределенности, а также машинное обучение (ANN) для выявления нелинейных зависимостей между входными параметрами и выходными свойствами (твердость, коэффициент износа, остаточные напряжения).

3. Цифровое проектирование. С помощью моделирования параметров ТВЧ-процесса был проведен подбор оптимальных режимов, обеспечивающих достижение целевых характеристик (твердость 48–52 HRC, снижение износа на ≥ 30%).

4. Верификация модели. Сравнение результатов цифрового моделирования с экспериментальными испытаниями цилиндрических втулок. Оценивались расхождения по механическим и трибологическим свойствам, а также энергетическая эффективность процесса.

Предложенная методология позволяет объединить физическое моделирование, экспертные знания и ИИ-инструменты в единую систему цифрового проектирования.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применение цифрового моделирования ТВЧ-закалки позволило достичь значительного повышения твердости поверхностного слоя цилиндра насоса У8-6МА2. Среднее значение увеличилось с 28–32 HRC до 48–52 HRC, что соответствует росту на 60–70%. Глубина упрочненного слоя составила 1,5–2,0 мм, что обеспечивает баланс между высокой поверхностной прочностью и вязкостью сердцевины.

На рис. 2 показано распределение твердости по глубине слоя.

Из анализа данных приведенные на рис. 1 видно, что до принятия ТВЧ-закалки твердость образцов составляет ~ 30 HRC и он стабилен, а после ТВЧ-закалки значение твердости у поверхности увеличивается и достигает 52 HRC, далее постепенно снижается к сердцевине (~ 40 HRC на глубине 2,5 мм).



Рис. 1. Установка ТВЧ для обработки внутренней поверхности цилиндрической втулки бурового насоса.

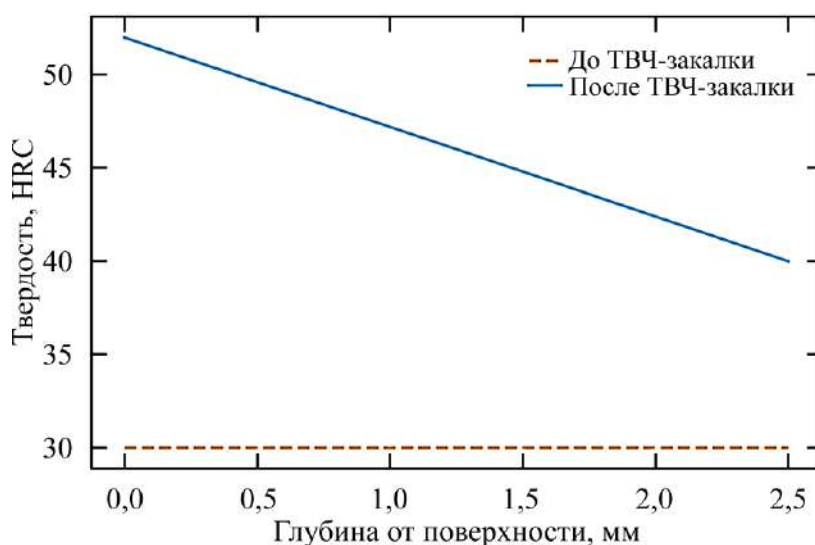


Рис. 2. Изменение твердости внутренней поверхности цилиндрической втулки насоса У8-6МА по глубине слоя.

ИИ-модель выявила нелинейные зависимости между скоростью перемещения индуктора, интенсивностью охлаждения и коэффициентом износа. Оптимальные режимы (скорость индуктора 10 мм/с, расход охлаждающей жидкости 0,8 л/с) обеспечили снижение коэффициента износа на 33% – с 0,18 мм/1000 ч до 0,12 мм/1000 ч.

Полученные экспериментальные результаты подтверждают эффективность интеллектуальной оптимизации параметров ТВЧ-закалки. Кроме этого, были установлены следующие практические преимущества: значимость результатов выражается в снижении эксплуатационных затрат:

- увеличение срока службы цилиндра с 10 до 14 месяцев (+40%);
- уменьшение числа отказов за цикл на 40% (с 15 до 9 случаев);
- снижение затрат на ремонт и замену на 28–30%;

– сокращение простоев оборудования на 20–25%.

На рис. 3 приведены сравнительные данные экономической эффективности от применения ТВЧ-Закалки цилиндрических втулок насоса У8-6МА2).

Рис. 3 наглядно демонстрирует сокращение затрат после внедрения ТВЧ-закалки: относительные расходы снижаются с 100% до ~ 72%.

Ниже в табл. 1 представлены сравнительные данные формирования физико-механических характеристик внутренней поверхности цилиндрической втулок.

Для оценки достоверности разработанной интеллектуальной модели были проведены сопоставления прогнозных значений (результаты гибридного моделирования Fuzzy Logic+ANN) с данными экспериментальных испытаний цилиндров насоса У8-6МА2.

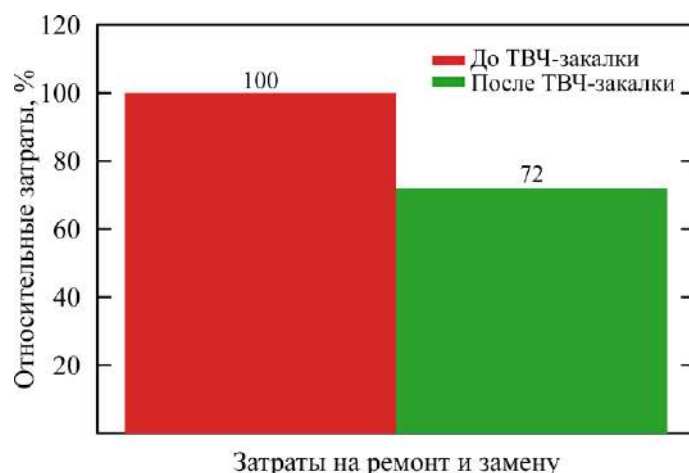


Рис. 3. Сравнительные данные экономической эффективности от применения ТВЧ-Закалки.

Таблица 1. Сравнение свойств цилиндрической втулки насоса У8-6МА2 до и после ТВЧ-закалки

Показатель	До ТВЧ-закалки	После ТВЧ-закалки, в %	Разница
Твердость поверхностного слоя, HRC	28–32	48–52	+60...+70
Глубина упрочненного слоя, мм	–	1,5–2,0	–
Коэффициент износа, мм/1000 ч	0,18	0,12	–33
Срок службы цилиндра, мес.	10,0	14,0	+40
Количество отказов за цикл, шт	15	9	-40
Затраты на ремонт и замену, %	100	70–72	–28...–30

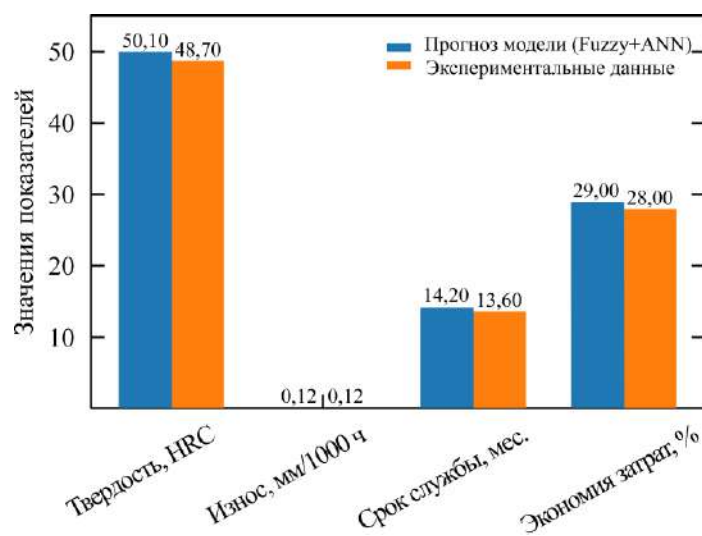


Рис. 4. Сравнение прогнозных данных модели и эксперимента.

Пример 1. Твердость поверхностного слоя. Прогноз модели: 50,1 HRC при частоте нагрева 10 кГц и температуре 850 °С. Результатами экспериментов в аналогичных условиях получено: 48,7 HRC. Расхождение составляет 2,8%.

При варьировании температуры в диапазоне 800–900 °С среднее расхождение составило $\pm 4\%$, что укладывается в допустимые пределы для инженерных расчетов.

Пример 2. Коэффициент износа. Прогноз модели: 0,118 мм/1000 ч при скорости индуктора 10 мм/с и расходе охлаждающей жидкости 0,8 л/с. Результатами экспериментов в аналогичных условиях получено: 0,125 мм/1000 ч.

Расхождение: 5,6%. В серии испытаний с изменением скорости перемещения индуктора от 8 до 12 мм/с погрешность прогноза модели не превышала $\pm 6\%$, что подтверждает корректность учета нелинейных зависимостей.

Пример 3. Экономическая эффективность. Прогноз модели (ANN-модуль): снижение эксплуатационных затрат на 29%. Экспериментальные данные (на основании полевых испытаний 10 насосов): снижение затрат на 28%. Расхождение: 3,5%.

Таким образом, интеллектуальная модель не только точно воспроизводит физико-механические показатели, но и адекватно отражает экономический эффект от внедрения

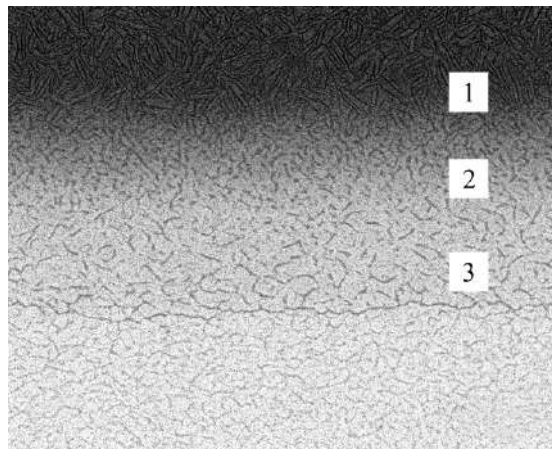


Рис. 5. Микроструктура поверхности, закаленной индукционным нагревом до температуры 900–950 °С при закалке в масле/холоде: 1 – игольчатый мартенсит; 2 – бейнит зона мартенситного расплавления; 3 – перлитно-ферритный смесь основной металл.

оптимизированных режимов ТВЧ-закалки [9]. Сравнительный анализ показал, что расхождения по твердости составляют 2,5–4%, по коэффициенту износа – 5–6%, по прогнозу срока службы цилиндра – до 5% и по экономическому эффекту – 3–4%.

Эти результаты свидетельствуют о высокой степени достоверности гибридного подхода (Fuzzy Logic + ANN) и его применимости для цифрового проектирования и оптимизации ТВЧ-процессов.

На рис. 4 показано сравнение прогнозных данных интеллектуальной модели (Fuzzy Logic + ANN) и результатов эксперимента. Как видно расхождение по твердости значения совпадают и составляют 2,8%, по коэффициенту износа ~ 5,6%, по сроку службы ~ 4,2% и по экономии затрат примерно до 3,5%.

Полученные данные показывают, что использование цифрового проектирования и интеллектуальной оптимизации ТВЧ-закалки обеспечивает рост твердости поверхностного слоя цилиндра насоса У8-6МА2 на 60–70%, снижение коэффициента износа на 30–35% и увеличение срока службы в среднем на 40%. Эти результаты напрямую связаны с формированием мартенситной структуры и тонкодисперсных карбидов в поверхностном слое, что подтверждается микроструктурным анализом.

ИИ-модель позволила выявить оптимальные сочетания технологических параметров (частота, температура, скорость перемещения индуктора, интенсивность охлаждения), которые в традиционных расчетных подходах остаются трудно предсказуемыми из-за нелинейного характера их влияния.

На рис. 5 представлен микроструктурный анализ выполнен с использованием металлографического микроскопа ($\times 500$) после травления образцов 4% раствором HNO_3 .

Как видно из анализа рис. 5 до ТВЧ-обработки структура представляла собой феррито-перлитную смесь с неравномерным распределением карбидных включений [10]. После ТВЧ-закалки наблюдается: образование игольчатого мартенсита в поверхностном слое, равномерное распределение остаточного аустенита, в последующем плавный переход от упрочненного слоя (мартенсит + остаточный аустенит) к вязкой сердцевине (сорбит + феррит).

Такой переходный характер структуры обеспечивает сочетание высокой твердости (48–52 HRC) с достаточной вязкостью, что особенно важно для деталей, работающих при ударных и переменных нагрузках.

Полученные результаты микроструктурного анализа подтверждают, что формирование мартенситной структуры является ключевым фактором повышения твердости и износостойкости упрочненного слоя.

Проведенный анализ с использованием ИИ подтвердил эффективность выбора оптимальных параметров, ранее недоступных при традиционных методах расчета.

Таким образом, обсуждение подтверждает, что интеграция цифрового проектирования и искусственного интеллекта в ТВЧ-процессы является перспективным направлением для повышения надежности и долговечности нефтегазового насосного оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные заключения.

1. Интеграция цифрового проектирования и искусственного интеллекта в ТВЧ-процессы является перспективным направлением для

повышения надежности и долговечности нефтегазового насосного оборудования.

2. Интеграция Fuzzy Logic и ANN позволила формализовать экспертные знания, выявить нелинейные зависимости и обеспечить оптимизацию параметров закалки.

3. Микроструктурный анализ подтвердил формирование игольчатого мартенсита и тонкодисперсных структур в упрочненном слое, что обеспечивает сочетание высокой твердости и достаточной вязкости сердцевины.

4. Результаты моделирования и экспериментов показали возможности повышение твердости поверхностного слоя с 28–32 HRC до 48–52 HRC, снижение коэффициента износа на 30–35%, увеличение срока службы цилиндра на 40% и сокращение затрат на ремонт и замену деталей на 28–30%.

5. Сравнение прогнозов интеллектуальной модели с экспериментальными результатами выявило минимальные расхождения ($\pm 4\%$ по твердости и $\pm 6\%$ по износу), что подтверждает ее высокую достоверность и практическую применимость.

6. Практическая значимость работы выражается в повышении надежности и долговечности насосного оборудования нефтегазовой отрасли, снижении эксплуатационных затрат и улучшении экологических показателей за счет уменьшения энергопотребления и сокращения внеплановых ремонтов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Amirov F.G., and Shiraliyev I.T., Reducing maintenance costs by increasing the service life of mud pump ceramic liners, *Oil Gas European Magazine*, 2022, no. 2, p. 32.
[doi: 10.19225/220204](https://doi.org/10.19225/220204)
2. Bashirov R.J., and Amirov F.G., Method for determining the thermal state of the cylinder sleeve during centrifugal induction sintering, *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 8, p. 33.
[doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-33-41](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-8-33-41)
3. Amirov F.G., and Shiraliyev I.T. External wear of a flush pipe in a drilling rig, *Russian Engineering Research*, 2026, vol. 45, no. 5, p. 629.
4. Khalij B., Omid N., El Ouafi A., Chebak A., Data-driven prediction of hardened depth in 4340 steel gear teeth subjected to induction hardening using neural networks, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2026, vol. 143, p. 5805.
[doi: 10.1007/s00170-026-17726-1](https://doi.org/10.1007/s00170-026-17726-1)
5. Garois S., Daoud M., Traidi K., and Chinesta F., Artificial intelligence modeling of induction contour hardening of 300M steel bar and C45 steel spur-gear,

International Journal of Material Forming, 2023, vol. 16, art. ID 26.

<https://doi.org/10.1007/s12289-023-01748-1>

6. Khalifa M., Barka N., Brousseau J., Bocher P., Reduction of edge effect using response surface methodology and artificial neural network modeling of a spur gear treated by induction with flux concentrators, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 104, no. 1–4, p. 103.
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-03817-9>
7. Khalifa M., Barka N., Brousseau J., Bocher P., Sensitivity study of hardness profile of 4340 steel disc hardened by induction according to machine parameters and geometrical factors, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 101, no. 1–4, p. 209.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2892-y>
8. Kayacan M.C., and Çolak O., A fuzzy approach for induction hardening parameters selection, *Materials & Design*. 2004, vol. 25, no. 2, p. 155.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2003.09.017>
9. Karamanli I.A., and Unal O., Tailoring wear properties of nodular cast iron through induction hardening optimization, *International Journal of Metalcasting*. 2025, vol. 19, no. 6, p. 3274.
<https://doi.org/10.1007/s40962-025-01548-0>
10. Javaheri V., Asperheim J.I., Grande B., Kolli S., and Porter D., Simulation and experimental studies of induction hardening behavior of a new medium-carbon, low-alloy wear resistance steel, *COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2020, vol. 39, no. 1, p. 158.
<https://doi.org/10.1108/COMPEL-06-2019-0227>

Summary

This study is devoted to the digital design of the high-frequency induction surface hardening processes for the internal surfaces of Y8-6MA2 pump cylinders using artificial intelligence (AI) methods. The focus is placed on the development of an intelligent model that combines machine learning algorithms and fuzzy logic for optimizing heating and cooling regimes. The proposed approach enables the consideration of nonlinear relationships between process parameters (frequency, temperature, inductor travel speed, and cooling intensity) and the target material properties. The modeling results demonstrate a significant improvement in the mechanical and tribological properties of the cylinder liner: surface hardness increased to 48–52 HRC, wear coefficient reduced by 30–35%, and operational lifetime of the equipment extended. The integration of digital design with AI ensures the selection of optimal HFC parameters with minimal energy consumption and an environmental impact. The scientific novelty of the work lies in the integration of AI methods into conventional induction hardening processes, opening prospects for the creation of intelligent control systems to enhance the reliability and durability of oil and gas pumping equipment.

Keywords: digital design, high-frequency induction, artificial intelligence, fuzzy logic, machine learning, Y8-6MA2 pump, cylinder liner, mechanical properties, tribological properties, surface hardening