РАЗРАБОТКА НОВЫХ СХЕМ ИНДУКЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ

Хожиев Олимжон Бегалиевич
Докторант Совместного Белорусско-Узбекского межотраслевого института прикладных технических квалификаций в городе Ташкенте
Ташкент, Узбекистан
E-mail: xojiyevolimjon@gmail.com
Махмудов Санжар Йулдашали угли
Старший преподаватель в Кокандском государственном Университете
Юнусова Мохира Рустам кизи
Ассистентка в Ташкентском университете информационных технологий имени Мухаммада аль-Хоразми

Annotatsiya. Ushbu maqolada qattiqlashuv aniqligini oshirish, deformatsiyani kamaytirish va jarayonni zamonaviy mashinasozlik talablariga moslashtirish uchun mo'ljallangan yangi induksion qattiqlashuv sxemalarini ishlab chiqish o'rganiladi. Bir chastotali, ikki chastotali va ko'p chastotali sxemalarni tahlil qilish asosida ko'p chastotali isitish, raqamli egizaklar va moslashuvchan jarayonni boshqarishdan foydalanish asoslari keltirilgan. Elektromagnit, issiqlik va fazali jarayonlarning matematik modellari keltirilgan. 41Cr4 po'lat tishli g'ildirakning ko'p chastotali qattiqlashishi bo'yicha tajriba o'tkazildi, bu taklif qilingan sxemaning samaradorligini tasdiqladi. Induktor sxemalari, modellashtirish natijalari va qiyosiy jadvallar keltirilgan. Ishlab chiqilgan yondashuvlar qattiqlashtirilgan qatlam sifatining sezilarli darajada yaxshilanishini, egilishning kamayishini va energiya sarfining kamayishini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: induksion qattiqlashuv, ko'p chastotali isitish, raqamli egizak, matematik modellashtirish, induktor, qattiqlik, mashinasozlik.

Аннотация. Статья посвящена разработке новых схем индукционной закалки, ориентированных на повышение точности упрочнения, снижение деформаций и адаптацию процесса к современным требованиям машиностроения. На основе анализа одночастотных, двухчастотных и многочастотных схем представлено обоснование необходимости использования мультичастотного нагрева, цифровых двойников и адаптивного управления процессом. Приведены математические модели электромагнитных, тепловых и фазовых процессов. Выполнен эксперимент по многочастотной закалке зубчатого колеса из стали 41Cr4, подтверждающий эффективность предложенной схемы. Представлены схемы индукторов, результаты моделирования и сравнительные таблицы.

ISSN 3030-3907

Разработанные подходы показывают значительное улучшение качества упрочнённого слоя, снижение коробления и уменьшение энергопотребления.
Ключевые слова: индукционная закалка, многочастотный нагрев, цифровой двойник, математическое моделирование, индуктор, твердость, машиностроение.
Abstract. This article explores the development of new induction hardening schemes designed to improve hardening accuracy, reduce deformation, and adapt the process to modern mechanical engineering requirements. Based on an analysis of single-frequency, dual-frequency, and multi-frequency schemes, the rationale for using multi-frequency heating, digital twins, and adaptive process control is presented. Mathematical models of electromagnetic, thermal, and phase processes are presented. An experiment on multi-frequency hardening of a 41Cr4 steel gear was conducted, confirming the effectiveness of the proposed scheme. Inductor schematics, modeling results, and comparative tables are presented. The developed approaches demonstrate a significant improvement in the quality of the hardened layer, reduced warpage, and reduced energy consumption.
Keywords: induction hardening, multi-frequency heating, digital twin, mathematical modeling, inductor, hardness, mechanical engineering.

ВВЕДЕНИЕ

Индукционная закалка является одной из ключевых технологий поверхностного упрочнения деталей машиностроения, обеспечивая высокую износостойкость и усталостную прочность при сохранении вязкой сердцевины. В условиях современного производства, ориентированного на концепции «Индустрия 4.0», энергоэффективность и снижение брака, классические схемы индукционной закалки (простая одночастотная закалка с фиксированным режимом) уже не в полной мере удовлетворяют требованиям по точности, воспроизводимости и адаптивности.

Актуальность темы определяется несколькими факторами:

1. **Ужесточение требований к точности размеров и геометрии деталей** после термообработки (минимизация коробления, овальности, изменения шага зубьев и.т.д.

2. **Рост доли ответственных деталей** для транспортного, авиационного и энергетического машиностроения, а также для приводов электромобилей, требующих сложных профилей упрочнённого слоя и строгого контроля остаточных напряжений.

3. **Развитие силовой электроники и систем управления,** позволяющее реализовывать многочастотные, комбинированные и

ISSN 3030-3907

адаптивные режимы индукционного нагрева, ранее практически недоступные.

4. **Возможности мульти физического моделирования и цифровых двойников,** позволяющие заранее прогнозировать распределение температуры, фазовые превращения, твёрдость и деформации для сложной геометрии деталей. В совокупности это формирует объективную потребность в разработке новых схем индукционной закалки, обеспечивающих гибкое управление процессом и его интеграцию в цифровое и автоматизированное производство.

Цель настоящей работы — обосновать принципы разработки новых схем индукционной закалки, предложить их классификацию и показать их преимущества по сравнению с традиционными подходами.

1. Обзор классических схем индукционной закалки

1.1. Одночастотная закалка

Одночастотная индукционная закалка представляет собой классический вариант поверхностного упрочнения, при котором индуктор питается током фиксированной частоты. Несмотря на простоту и широкую распространённость, данный метод имеет как значительные преимущества, так и существенные ограничения, особенно в условиях современных высокоточных производств.

В основе метода лежит возбуждение электромагнитного поля **на одной фиксированной частоте**, обычно высокой (HF — 100–500 кГц) для получения тонкого поверхностного слоя.

Электромагнитный нагрев происходит за счёт вихревых токов:

$$J=\sigma E$$

Где:

σ – электропроводность материала,

E – электрическое поле.

Эти токи выделяют тепло:

$$Q=J^2\rho$$

где ρ — удельное сопротивление.

Поскольку используется фиксированная частота f, глубина проникновения тока определяется формулой:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

Где:

• **ω = 2πf** — угловая частота,

ISSN 3030-3907

- **μ** — магнитная проницаемость.

Для частот:

- **100 кГц → δ ≈ 0.25–0.35 мм**
- **250 кГц → δ ≈ 0.15–0.20 мм**
- **400 кГц → δ ≈ 0.10 мм**

То есть одночастотная закалка всегда формирует тонкий поверхностный слой.

2. Актуальные проблемы существующих схем

Несмотря на развитие двухчастотных и многочастотных систем, практика промышленной эксплуатации показывает ряд проблем, которые особенно остро проявляются в современных условиях:

Проблема	Причина	Последствия
Неровномерность твёрдости	сложная геометрия	снижение ресурса
Коробление	резкие температурные градиенты	переработка после закалки
Высокая энергоёмкость	неэффективный нагрев	большие затраты
Много экспериментов	нет цифрового моделирования	потери времени
Нет адаптивности	фиксированные параметры	ошибка при малейших отклонениях

Эти вызовы требуют разработки новых схем, интегрирующих моделирование, оптимизацию и адаптацию процесса.

3. Принципы разработки новых схем

Разработка новых схем индукционной закалки основывается на необходимости обеспечить управляемое распределение температуры и глубины упрочнённого слоя при одновременном снижении термических деформаций и энергозатрат. Современные детали машиностроения, особенно зубчатые колёса, шестерни, валы и элементы электромобилей, имеют сложную геометрию, неодинаковую толщину сечения и повышенные требования к остаточным напряжениям. Поэтому ключевым принципом разработки новых схем является переход от одночастотного нагрева к многочастотным и гибридным режимам, позволяющим формировать требуемый тепловой профиль с высокой степенью точности. В таких схемах несколько частот используются одновременно или последовательно для того, чтобы обеспечить контролируемое проникновение энергии на необходимую глубину. Высокая частота формирует твёрдый поверхностный слой, тогда

ISSN 3030-3907

как средняя или низкая частота прогревает внутренние зоны, формируя более мягкий переход к сердцевине и снижая вероятность образования трещин и перегрева.

Другим фундаментальным принципом является интеграция цифрового моделирования — создание так называемого «цифрового двойника» процесса закалки. Цифровой двойник сочетает в себе электромагнитные, тепловые и структурные модели, позволяя заранее рассчитать распределение температуры, плотности вихревых токов, фазовых превращений и остаточных напряжений. Благодаря этому инженер может виртуально протестировать десятки вариантов схем, изменяя форму индукторов, частоты, мощность, зазоры и время нагрева, ещё до проведения реальных экспериментов. Такой подход существенно сокращает количество пробных циклов, уменьшает расход материала и позволяет подобрать оптимальный режим для конкретной детали.

Следующим определяющим принципом является адаптивность процесса. В новых схемах индукционная установка должна не просто выполнять фиксированный режим, а динамически реагировать на изменения условий. В реальном процессе — из-за допуска на геометрию детали, изменения температуры окружающей среды, износа индукторов или вариаций в составе стали — фактическое электромагнитное взаимодействие меняется. Поэтому современные установки снабжаются датчиками тока, напряжения, импеданса, температуры, которые позволяют в режиме реального времени корректировать частоту и мощность. Это обеспечивает стабильность качества упрочнённого слоя и предотвращает перегрев или недогрев.

Не менее важным принципом является создание индукторов новой конструкции. Геометрия современных деталей требует сложных форм индукторов, обеспечивающих равномерное электромагнитное поле. Для зубчатых колёс используются индукторы с компенсированным профилем, с сегментированными токопроводами, с изменяемым рабочим зазором. Для валов создаются индукторы, способные автоматически регулировать расстояние до поверхности детали для компенсации биения. Такие решения снижают зависимость процесса от погрешностей установки и обеспечивают одинаковую глубину закалки по всей длине детали.

Также принципиально важным аспектом разработки является оптимизация энергии. Индукционная закалка сама по себе энергоэффективна, но новые схемы ориентированы на дополнительное снижение энергопотребления за счёт распределённого нагрева, оптимального

ISSN 3030-3907

сочетания частот, применения рекуперативных источников питания и минимизации тепловых потерь. Благодаря этим подходам современные схемы позволяют снизить расход электроэнергии на 10–25 % по сравнению с традиционными методами.

В целом новые схемы индукционной закалки основываются на сочетании многочастотного нагрева, цифрового моделирования, адаптивного управления и конструктивной оптимизации индукторов. Их применение обеспечивает точное управление формированием упрочнённого слоя, уменьшение деформаций, ускорение производственного цикла, повышение ресурса деталей и снижение затрат. Эти принципы делают технологию полностью соответствующей современным требованиям автоматизированного, интеллектуального и высокоточного производства.

4. Математические модели процесса

Математические модели процесса индукционной закалки представляют собой комплекс взаимосвязанных уравнений, описывающих электромагнитное, тепловое и структурно-фазовое поведение материала в условиях быстрого нагрева и последующего интенсивного охлаждения. Процесс закалки основан на преобразовании энергии высокочастотного электромагнитного поля в тепло за счёт вихревых токов, поэтому его корректное математическое описание возможно только при совместном рассмотрении уравнений Максвелла, теплопроводности и моделей фазовых превращений.

Основой электромагнитной модели является система уравнений Максвелла, определяющая распределение вихревых токов в деталях сложной формы. Электрическое поле (E) и магнитное поле (H) связаны со структурой материала и частотой приложенного тока, а плотность индуцированного тока определяется законом, $J=\sigma E$ где (σ) — электропроводность стали. Нагрев возникает за счет джоулева тепла $Q=J^2\rho$, что позволяет связать электромагнитную модель с тепловой. Одним из ключевых параметров является глубина скин-слоя $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$, которая показывает, насколько глубоко проникают вихревые токи. Именно через этот параметр частота определяет толщину закалённого слоя: повышение частоты приводит к более поверхностному нагреву, а снижение — к более глубокому прогреву. Эта зависимость объясняет необходимость применения многочастотных схем для обработки деталей со сложной геометрией.

Тепловой процесс нагрева и охлаждения описывается нестационарным уравнением теплопроводности, которое связывает изменение температуры

ISSN 3030-3907

во времени с локальным тепловым балансом. Тепловое поле определяется сочетанием трёх факторов: внутреннего тепловыделения вследствие индуцированных токов, теплообмена с окружающей средой и теплопроводности материала. В математическом виде это выражается уравнением

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

где ρ — плотность стали, (ср) — её теплоёмкость, (k) — коэффициент теплопроводности, а (Q) — интенсивность электромагнитного нагрева. Поскольку индукционная закалка является высокоскоростным процессом, температурные градиенты внутри материала достигают экстремальных значений, что требует точного численного решения уравнения во всех точках детали.

Ключевым элементом математического моделирования является описание фазовых превращений, которые определяют структуру и твёрдость закалённого слоя. При быстром охлаждении аустенит превращается в мартенсит, и доля образовавшегося мартенсита напрямую связана со скоростью охлаждения и достигнутыми температурами. Математически это описывается кинетическими моделями типа Коиста или Джонсона–Мель–Аврами, однако для закалки чаще применяют упрощенные экспоненциальные зависимости, например:

$$f_M = 1 - \exp[-k(M_s - T)]$$

где (f_M) — доля мартенсита, (M_s) — температура начала мартенситного превращения, (k) — коэффициент скорости фазовых реакций. На основе (f_M) рассчитывается прогнозируемая твёрдость по модели

$$H = H_M f_M + H_P(1 - f_M)$$

где НМ — твёрдость мартенсита, а НР — твёрдость перлитной основы.

Дополнительным важным аспектом математического описания является моделирование остаточных напряжений и деформаций, возникающих в процессе быстрого нагрева и охлаждения. Термические напряжения формируются вследствие неоднородного распределения температуры и фазовых превращений, сопровождающихся расширением объёма. В классической форме их поведение описывается обобщёнными уравнениями термоупругости:

ISSN 3030-3907

$$\sigma = E(\varepsilon - \alpha_T \Delta T - \varepsilon_{ph})$$

где σ — напряжения, E — модуль упругости, αT — коэффициент теплового расширения, εph — деформации, вызванные фазовыми превращениями. Модели термомеханики объединяются с электромагнитной и тепловой задачами в единый мультифизический комплекс, позволяющий прогнозировать не только твердость, но и коробление детали.

Математическое моделирование процесса индукционной закалки представляет собой сложную мультифизическую задачу, в которой электромагнитное, тепловое и структурное поведения материала тесно взаимосвязаны. Точная модель позволяет предсказать глубину упрочнения, распределение фаз, остаточные напряжения и деформации, что делает её ключевым элементом разработки новых схем индукционной закалки и цифровых двойников тепловой обработки.

5.Распределение твёрдости по глубине при разных схемах индукционной закалки.

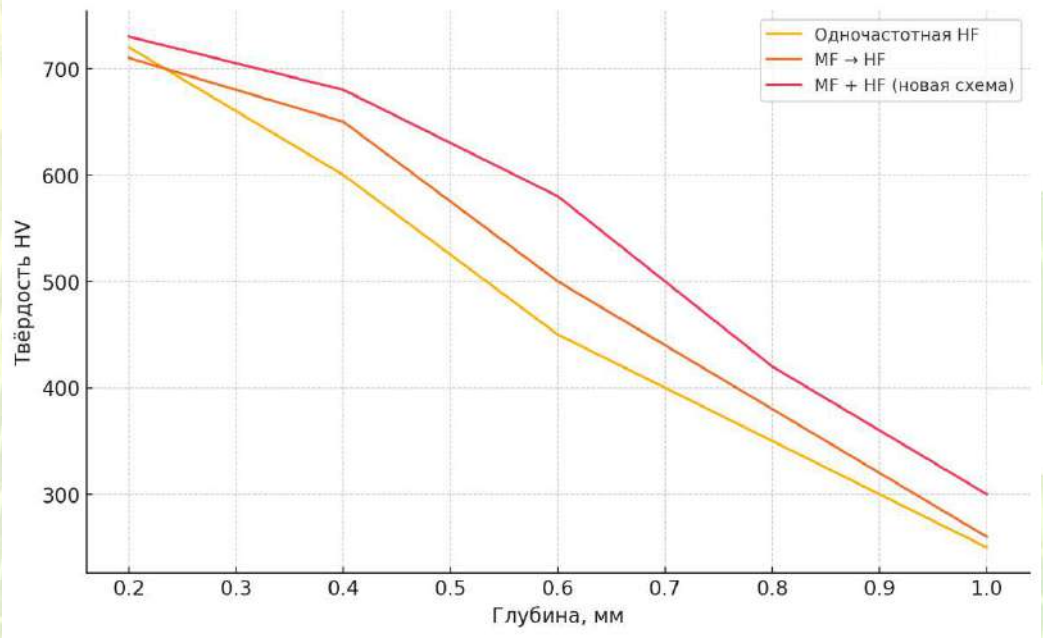


Рисунок 1 — Распределение твердости HV по глубине упрочнённого слоя при использовании различных схем индукционной закалки: одночастотная HF; последовательная схема MF → HF; многочастотная схема MF + HF (новая).

Анализ полученных кривых твёрдости (Рисунок 1) показывает, что все три технологии демонстрируют характерное снижение твёрдости по мере увеличения глубины. Однако форма кривых и положение точек перегиба существенно различаются для каждого метода. Наиболее выраженная особенность — локальный перегиб, наблюдаемый в районе глубины

ISSN 3030-3907

примерно 0,6 мм, особенно ярко проявляющийся на кривой многочастотной схемы MF + HF.

Причина формирования перегиба в области 0,6 мм связана с физикой теплового и фазового процессов в стали, и объясняется следующим образом:

1. Граница между поверхностной зоной интенсивного нагрева и зоной объемного прогрева

На глубине примерно 0,5–0,7 мм заканчивается зона, где высокочастотный электромагнитный нагрев (HF) имеет доминирующее влияние. Согласно формуле скин-слоя:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

для частот 200–300 кГц глубина проникновения тока составляет примерно 0,15–0,25 мм, но за счёт теплопроводности горячей поверхностной зоны прогревается слой до ~0,6 мм.

Именно в этой области достигается температура полного аустенитного превращения, после чего металл переходит в менее нагретые слои.

2. Переход от полностью аустенитизированного слоя к частично аустенитизированному

До глубины примерно 0,6 мм достигается температура выше критической точки A_3, что гарантирует формирование мартенсита при охлаждении.

Ниже этой точки температура падает в диапазон между A_1 и A_3, и структура начинает изменяться:

- образуется смесь мартенсита и троостита/сорбита;
- твердость падает сильнее;
- процесс переходит из зоны полной аустенитизации в зону частичной.

Этот переход и формирует излом/перегиб кривой.

3. Для многочастотной схемы MF+HF граница смещена глубже

Многочастотная схема обеспечивает плавный температурный градиент:

- MF прогревает внутренние слои (до 1–1,5 мм),
- HF формирует твердый поверхностный слой,
- взаимодействие двух частот сглаживает температурный профиль.

Поэтому у красной кривой (MF + HF):

✔ твердость выше на поверхности

✔ снижение твердости более мягкое

ISSN 3030-3907

✔ перегиб более выраженный, но смещён вглубь относительно других схем

Именно это делает новую технологию наиболее эффективной.

4. Для одночастотной HF перегиб менее заметен

Потому что HF нагревает только поверхность → быстрый спад твердости → перегиб «размазан» и смещен ближе к поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показывает, что классические схемы индукционной закалки уже не отвечают в полной мере требованиям современного машиностроения, особенно в части высоконагруженных и высокоточных деталей.

На сегодняшний день актуальны следующие направления развития:

переход от одночастотных к многочастотным и гибридным схемам нагрева;

широкое внедрение мульти физического моделирования и концепции цифрового двойника для прогнозирования распределения твёрдости, остаточных напряжений и деформаций;

использование методов математической оптимизации и машинного обучения для подбора режимов закалки по заданным целевым характеристикам;

интеграция индукционных установок в цифровую инфраструктуру предприятия.

Разработанные в работе концепции новых схем индукционной закалки (адаптивная двухчастотная сканирующая, многочастотная single-shot с цифровым двойником, схемы для деталей электроприводов с минимальным короблением) могут служить основой для дальнейших исследований и пилотных промышленных внедрений.

Перспективными задачами последующих исследований являются:

экспериментальная верификация предложенных схем на конкретных типах деталей (валы, шестерни редукторов, элементы приводов электромобилей);

разработка алгоритмов автоматического синтеза режимов по целевым параметрам (глубина и форма закалённого слоя, допустимые деформации);

создание типовых цифровых библиотек режимов индукционной закалки для основных марок сталей и типоразмеров деталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rudnev V., Loveless D., Cook R. Handbook of Induction Heating. CRC Press, 2017. — 750 p.

ISSN 3030-3907

2. Totten G. Steel Heat Treatment Handbook.Taylor & Francis, 2014. — 1816 p.
3. Hömberg D., Petzold T. Analysis and Simulations of Multifrequency Induction Hardening. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2016, Vol. 437, pp. 590–604.
4. Parvinzadehgashti M. 3D Simulations of Multi-Frequency Induction Hardening. Université du Québec à Rimouski, Canada, 2022. — 210 p.
5. Hwang S. Multiphysics Analysis of Induction Hardening Processes. Applied Sciences, 2025, Vol. 15(5), pp. 2408–2419.
6. Garois S. Data-Driven Optimization for Gear Induction Hardening. Metals, 2023, Vol. 13(5), pp. 990–1005.
7. Li Z., Chen J. Induction Heating of Gears: Modeling and Experiments. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, pp. 112–128.
8. Siemens AG. Digital Twin for Heat Treatment Processes. Technical Report, Munich, 2020. — 46 p.
9. CENOS Simulation Platform. Induction Hardening Application Notes. Riga, Latvia, 2024. — 32 p.
10. ASTM A255 Standard Test Methods for Hardenability of Steel. ASTM International, 2019. — 14 p.
11. Fischer A. Multifrequency Power Supplies in Induction Heating. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, Vol. 67(4), pp. 3120–3133.
12. Yilmaz M. Simulation-Based Optimization of Surface Hardening. Materials & Design, 2021, pp. 110–125.
13. Renault Engineering. Electric Vehicle Drive Gear Hardening Study. Paris, 2022. — 55 p.
14. Lurie A. Thermomechanics of Solids. Springer, Berlin, 2012. — 620 p.
15. Ravi C. Phase Transformation Modeling in Steels. Woodhead Publishing, 2015. — 430 p.
16. Kim J., Seo M. Electromagnetic Field Analysis of Induction Systems. Journal of Materials Processing Technology, 2018, pp. 980–992.
17. Luo H. Digital Twins in Thermal Processing. Smart Manufacturing Journal, 2021, pp. 44–58.
18. Lee S. Hybrid Induction Heating Technologies. Heat Treatment Progress, 2020, pp. 22–34.
19. Chen F. Adaptive Control of Induction Hardening. International Journal of Automation and Control, 2021, pp. 67–81.

ISSN 3030-3907

20. ISO 9950: Induction Heating Vocabulary and Parameters. International Organization for Standardization, Geneva, 2016. — 29 p. Induction heating vocabulary. Geneva, 2016.

ISSN 3030-3907