

ПОВЫШЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЗА СЧЕТ ИНДУКЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

А.Г. Коробейников^{1,2}, д-р техн. наук, профессор

В.Л. Ткалич², д-р техн. наук, профессор

О.И. Пирожникова², канд. техн. наук, доцент

¹Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (СПбФ ИЗМИРАН)

²Национальный исследовательский университет ИТМО
(Россия, г. Санкт-Петербург)

DOI:10.24412/2500-1000-2023-8-2-129-136

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-5323.2022.4

Аннотация. Статья посвящена актуальной задаче продления срока службы элементной базы объектов транспортной инфраструктуры, в частности металлических трубчатых конструкций и элементов разъёмных соединений, за счет обработки рабочих поверхностей с целью создания на поверхности металла защитных слоев с заранее заданными характеристиками. Проводимая обработка установила специфические условия эксплуатации и технологические особенности реальных объектов транспортной инфраструктуры. Это позволило говорить о создании долговечных до (50 лет срока службы) металлических элементов, что отвечает (соответствует) уровню конкурентоспособности данных изделий при соблюдении рентабельности и высокого качества отечественной промышленности.

Ключевые слова: защитные слои, электромагнитная обработка, срок службы, индукционные системы, индукционная закалка, металлоизделия, ОТИ.

С переходом на отечественную комплектующую элементную базу для создания конкурентоспособных и рентабельных ОТИ повысилась актуальность вопросов о разработке путей увеличения сроков службы, снижения затрат на обслуживание объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ) и обеспечение безопасности эксплуатации создаваемой продукции.

Различные негативные воздействия (коррозионные, электрохимические, деформационные, температурные и т.д.) уменьшают срок службы, ухудшают внешний вид, снижают вероятность безаварийной эксплуатации, увеличивают материальные затраты. Создание комплексных защитных покрытий позволит защитить от большинства негативных эффектов со стороны внешних и внутренних факторов.

Применение переменных электромагнитных полей и ультразвукового воздействия позволит получать энергоэффективные технологии обработки поверхности с формированием на них защитного слоя, который увеличит срок службы металлоизделий ОТИ с различными габаритными размерами.

При монтаже металлоконструкций на ОТИ используются разъёмные (болтовые, винтовые, шпильки) соединения и неразъёмные (сварные швы).

Процесс исследования качества изделий целесообразно осуществлять на элементной базе более всего подверженной деформационным нагрузкам в ходе эксплуатации, например, болтов, винтов и шпилек. Эти металлоизделия проходили операцию контролируемой закалки, которая проводилась индуцированными токами. Формирование защитных слоев можно производить

на широком спектре деталей различных габаритов [1].

Для эффективного индукционного нагрева требуется достижение определенного набора условий: – заготовки должны обладать высокой проводимостью; – переменный ток в катушке должен иметь частоту, коррелирующую с проводимостью и магнитными свойствами заготовок. Правильный выбор материала и рабочей частоты позволяет реализовать нагрев ферромагнитного образца от комнатной температуры до 700°C в течении несколько секунд. Это объясняется тем, что высокая магнитная проницаемость железосодержащего материала приводит к возбуждению сильных вихревых токов и ярко-выраженному проявлению скин-эффекта, за счёт которого ток вытесняется и течёт по поверхности заготовки. Индукционный нагрев ферромагнитного металла дополнительно усиливается за счёт циклического намагничивания областей материала переменным током. Быстроизменяющееся переменное магнитное поле вызывает потери на гистерезис, которые приводят к генерации большего количества тепла.

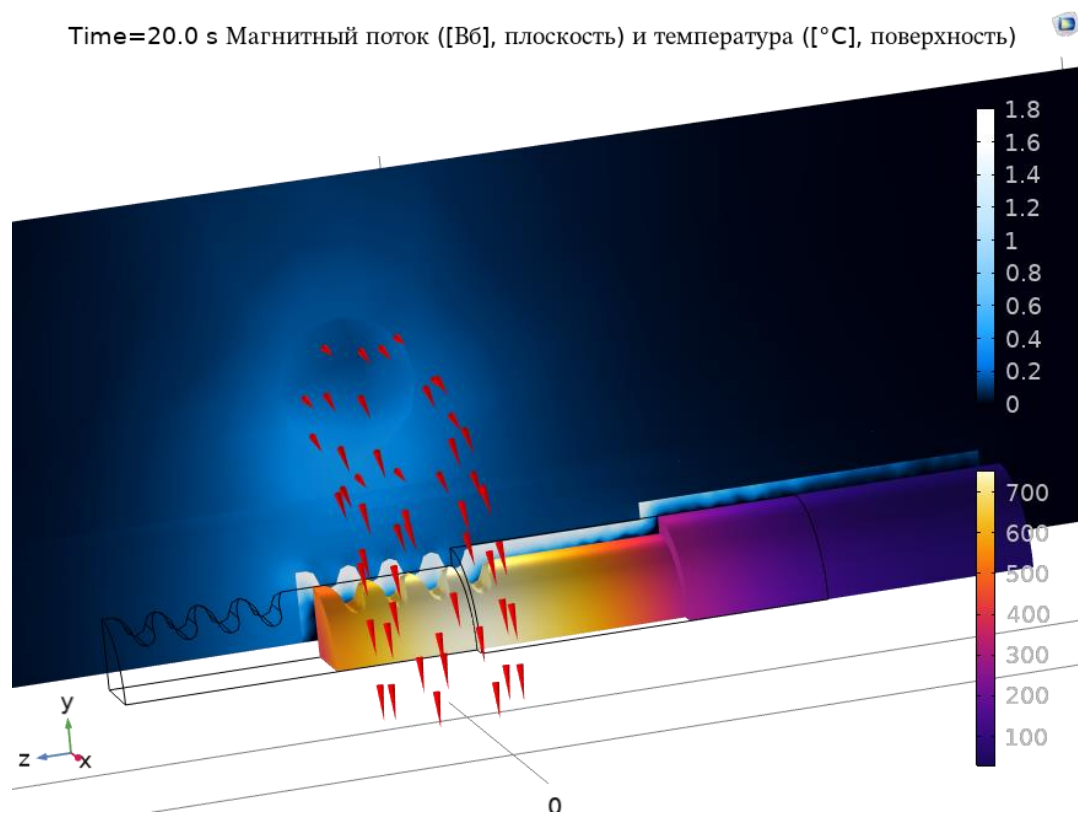
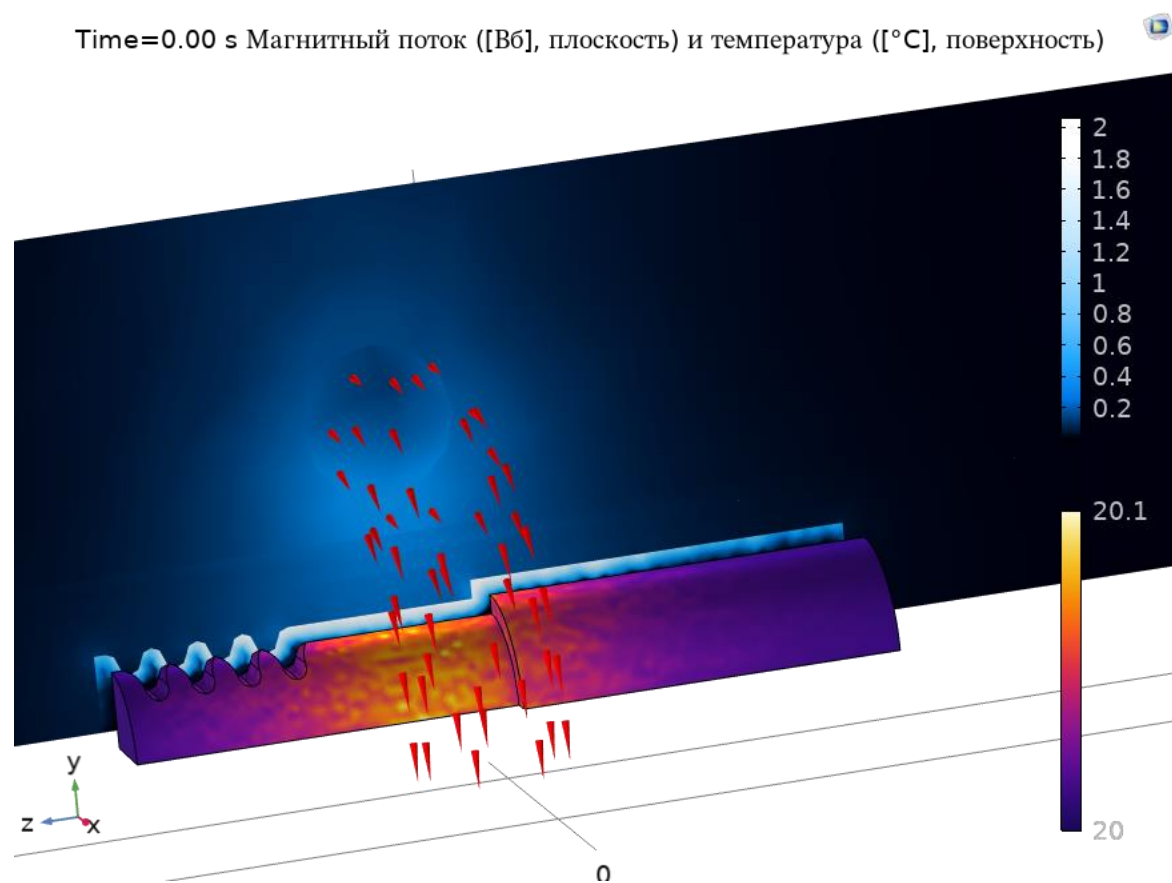
При использовании цифрового двойника для системы индукционной закалки возможно проводить оптимизацию процесса обработки поверхности мелких деталей и крупногабаритных металлокон-

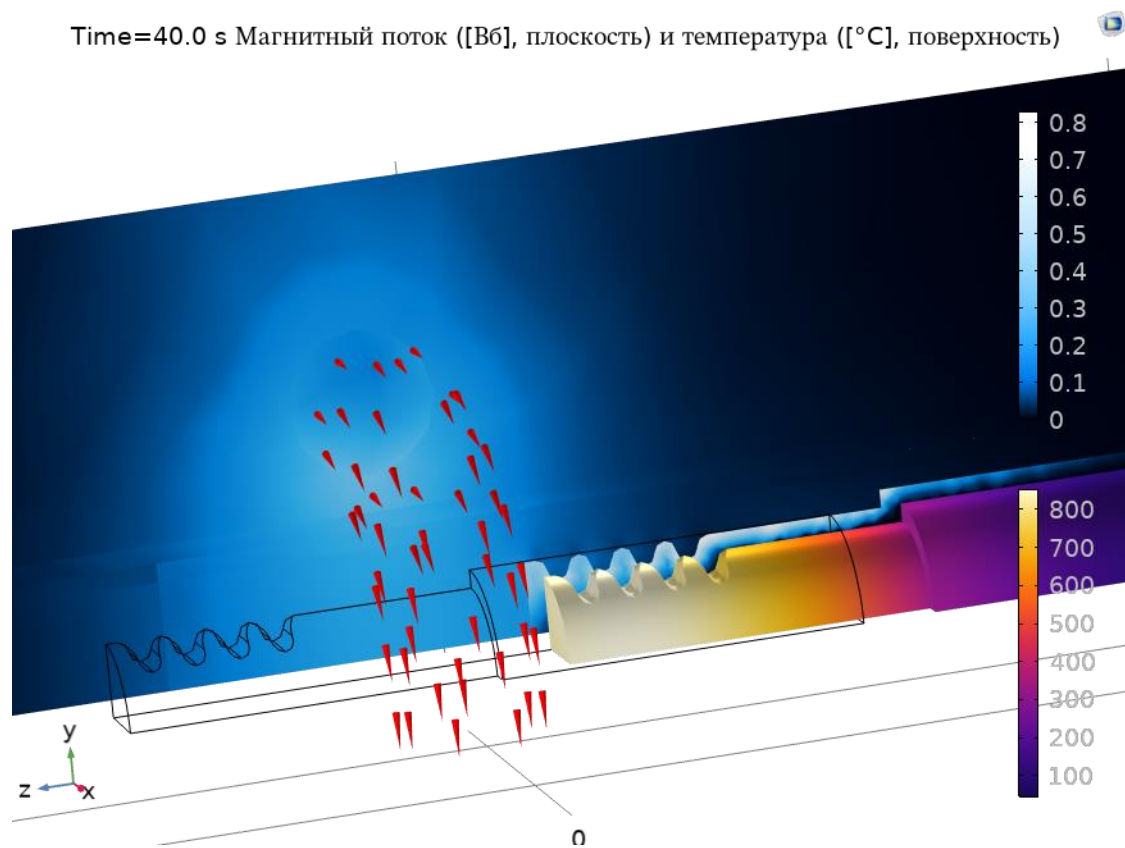
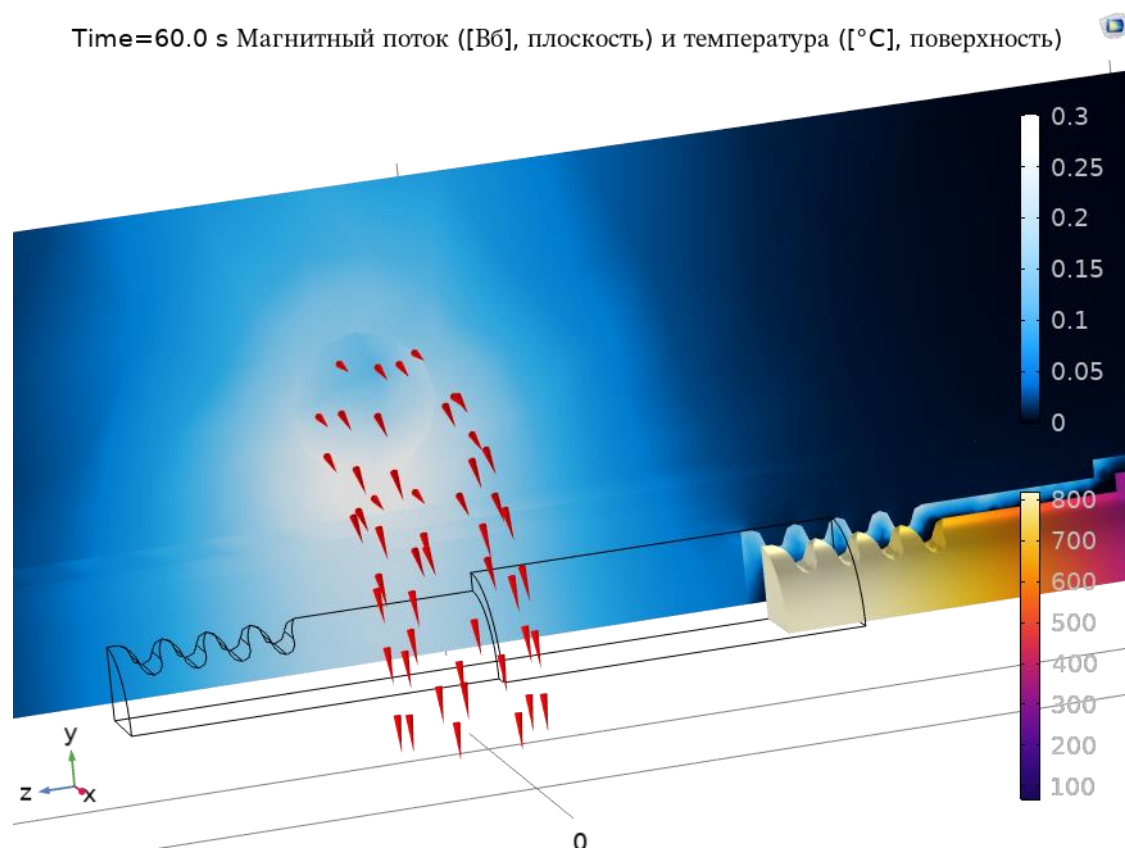
струкций, используемых на ОТИ [2] Это позволяет создавать высококачественные защитные слои на поверхности элементов ОТИ, а также ведет к улучшению эргономических и прочностных свойств изделий.

В ходе математического моделирования имитировалась закалка вала механизма передачи, закрепляющей шпильки или любого другого подобного механического элемента, который подвергается сильным механическим напряжениям. Моделирование проводилось при помощи системы MATLAB, позволяющая решать задачи в различных предметных областях [3-5].

Математическая модель базируется на сопряжении уравнений Максвелла и теплопроводности [6, 7]. Численные эксперименты проводились для частоты 1000 Гц и 25000 Гц. Результаты экспериментов с частотой 1000 Гц представлены на рис. 1-4. А на рис. 5-8. представлены результаты экспериментов с частотой 25000 Гц. На рис. 1-4 представлены состояния заготовки в различное время – 0, 20, 40 и 60 с. На рис. 5-8 представлены состояния заготовки в – 0, 6, 12 и 18 с.

Схематически показано направление магнитного потока в виде красных стрелочек. Температуру участков поверхности заготовки можно оценить по цветовой шкале, расположенной справа. Кроме того, начиная с рис. 2 (рис. 6) можно видеть положение заготовки.



Рис. 3. Состояние заготовки в момент $t = 40$ с.Рис. 4. Состояние заготовки в момент $t = 60$ с.

Time=0.00 с Магнитный поток ([Вб], плоскость) и Температура ([°C], поверхность)

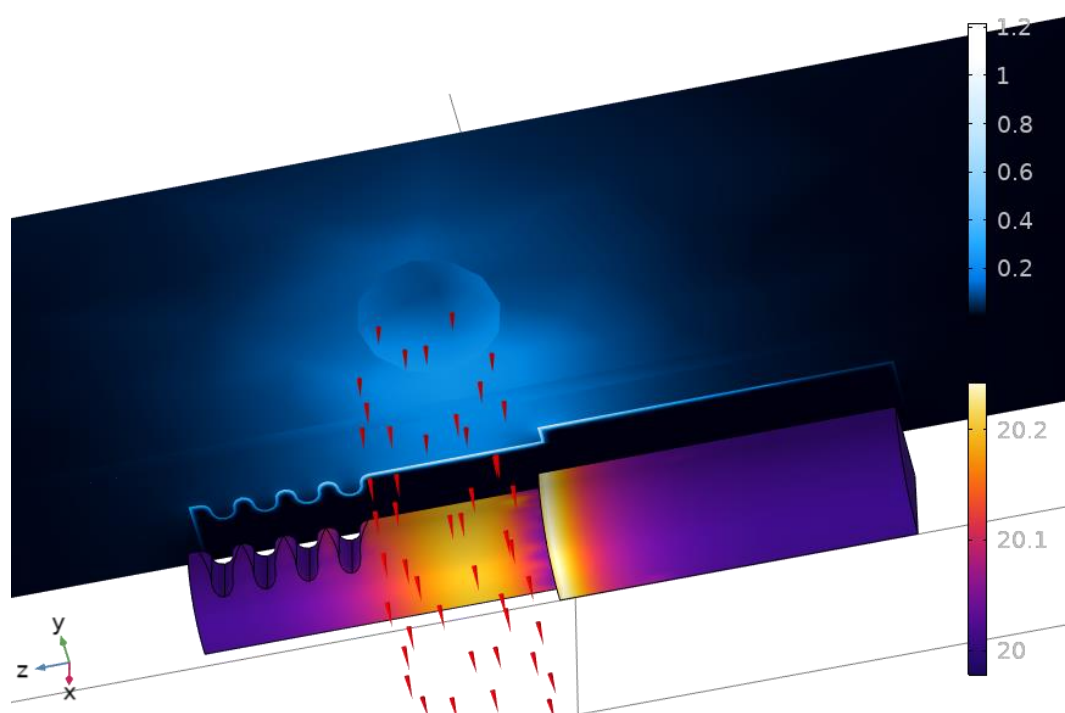


Рис. 5. Состояние заготовки в момент $t = 0$ с.

Time=6.00 с Магнитный поток ([Вб], плоскость) и Температура ([°C], поверхность)

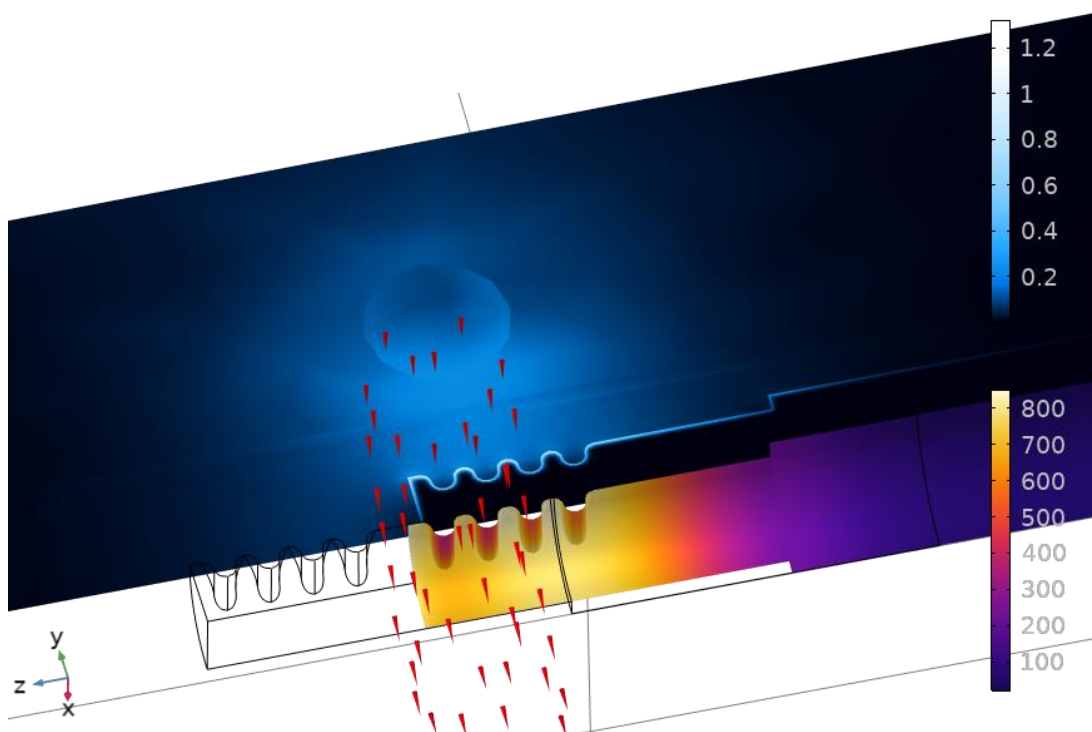
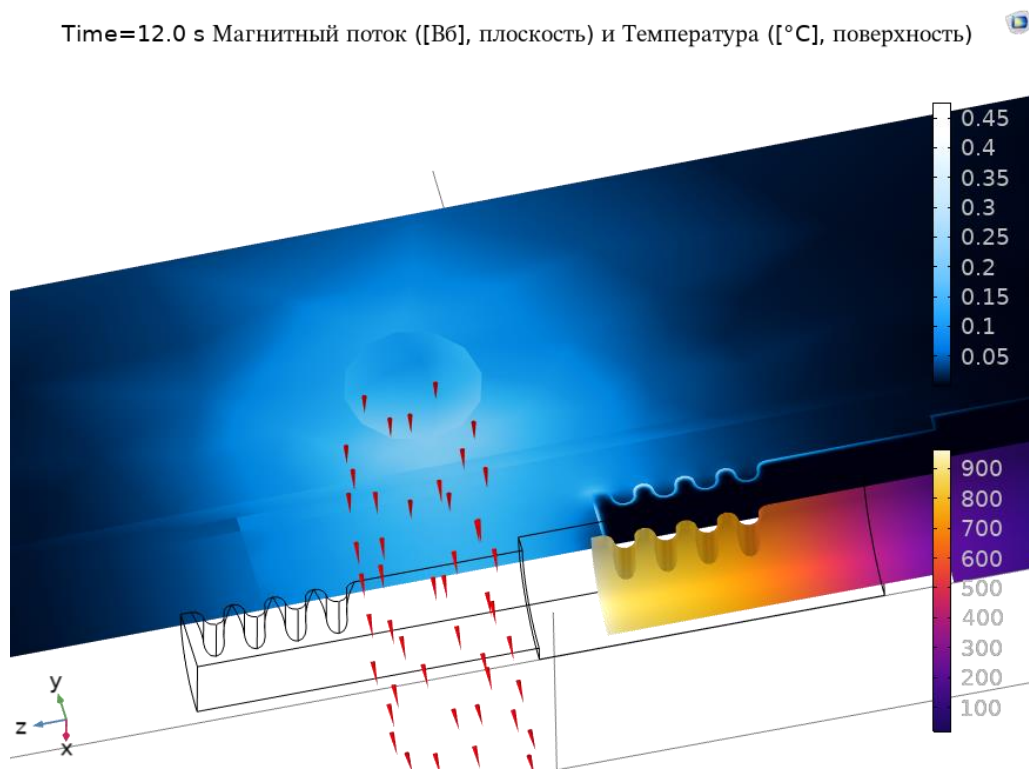
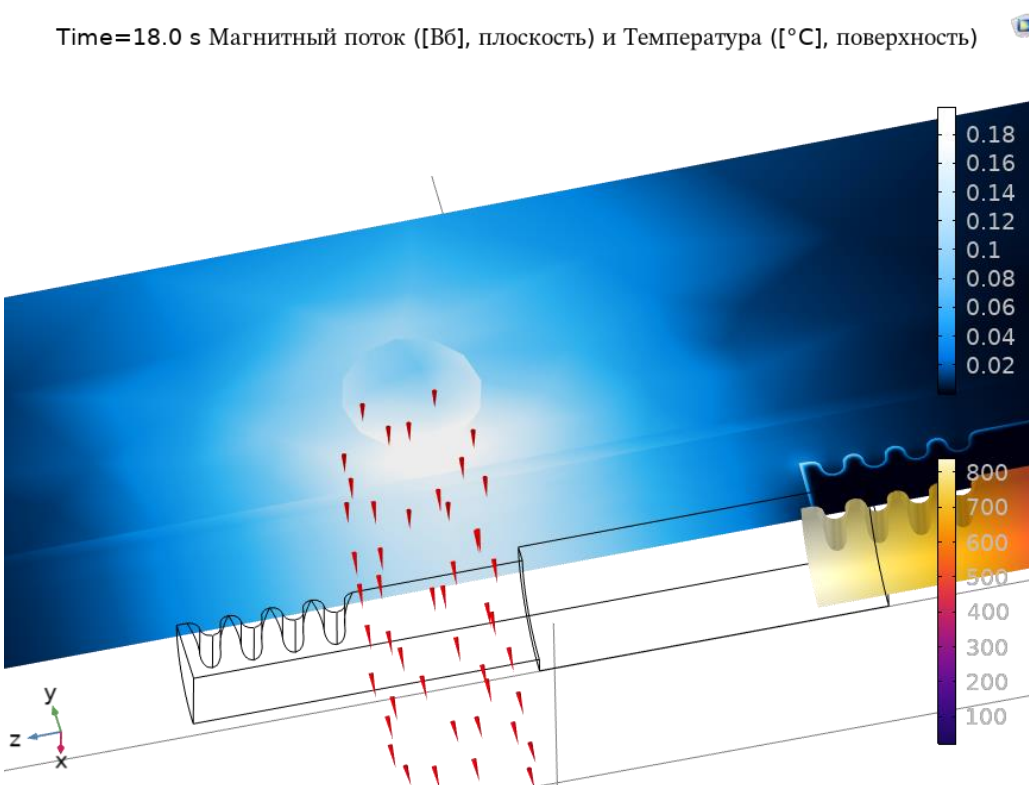


Рис. 6. Состояние заготовки в момент $t = 6$ с.

Рис. 7. Состояние заготовки в момент $t = 12$ с.Рис. 8. Состояние заготовки в момент $t = 18$ с.**Выводы.**

Закалка заготовок в рамках индуцированного тока нагрева является полезным эффектом, однако возможны и негативные

последствия. Тепло, которое приводит к упрочнению, может сделать образец более подверженным трещинам. Для достижения разумного баланса между закалкой и пла-

стичностью в каждой части заготовки можно подстроить ключевые управляющие параметры индукционного нагрева. Этими параметрами служат: частота тока, амплитуда тока в катушке и скорость перемещения заготовки через катушку.

Варьирование эти тремя параметрами индукционной системы позволяет добиваться высокой эффективности при соблюдении технологических достоинств

метода и делает этот метод конкурентоспособным на мировом уровне.

Кроме того, как следует из полученных результатов, изменение рабочей частоты не только изменяет пиковую температуру, но и приводит к её перераспределению по глубине заготовки. Полученная информация может быть использована в рамках других исследований. Например, эту информацию можно использовать в исследованиях фазовых превращений.

Библиографический список

1. Язовских В.М. Математическое моделирование и инженерные методы расчета в сварке: в 2 ч. Ч. 2. Тепловые процессы при сварке и моделирование в пакете MathCad. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 119 с.

2. Tsung-Nan Tsai. Thermal parameters optimization of a reflow soldering profile in printed circuit board assembly: A comparative study // *Applied Soft Computing*. – 2012. – Vol. 12. – P. 2601-2613.

3. Коробейников А.Г., Гришенцев А.Ю. Разработка и исследование многомерных математических моделей с использованием систем компьютерной алгебры // СПбНИУ ИТМО. – Санкт-Петербург: СПбНИУ ИТМО, 2013. – 100 с.

4. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Алгоритм поиска, некоторые свойства и применение матриц с комплексными значениями элементов для стеганографии и синтеза широкополосных сигналов // *Журнал радиоэлектроники*. – 2016. – № 5. – С. 9.

5. Коробейников А.Г., Кутузов И.М., Колесников П.Ю. Анализ методов обфускации // *Кибернетика и программирование*. – 2012. – № 1. – С. 31-37.

6. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Том 6. Электродинамика – М.: Изд-во МИР, 1977. – 347 с.

7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. – Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. – 664 с.

INCREASING THE SERVICE LIFE OF THE ELEMENT BASE OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE OBJECTS DUE TO INDUCTION HARDENING OF THE SURFACE OF METAL STRUCTURES

A.G. Korobeynikov^{1,2}, *Doctor of Technical Sciences, Professor*

V.L. Tkalich², *Doctor of Technical Sciences, Professor*

O.I. Pirozhnikova², *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*

¹**Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences St.-Petersburg Filial (SPbF IZMIRAN)**

²**ITMO University**

(Russia, St. Petersburg)

***Abstract.** The article is devoted to the urgent task of extending the service life of the element base of transport infrastructure objects, in particular metal tubular structures and elements of detachable connections, by processing working surfaces in order to create protective layers on the metal surface with predetermined characteristics. The ongoing processing established specific operating conditions and technological features of real transport infrastructure facilities. This made it possible to talk about the creation of durable metal elements (up to 50 years of service life), which corresponds (corresponds) to the level of competitiveness of these products, while maintaining the profitability and high quality of the domestic industry.*

***Keywords:** protective layers, electromagnetic processing, service life, induction systems, induction hardening, hardware, OTI.*