



Столыпинский  
вестник

Научная статья

Original article

УДК 621

**ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО  
СПЛАВА**

**SURFACE HARDENING OF TITANIUM ALLOY PARTS**

**Цун Цифен**, магистрант, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

**Дин Цзыци**, магистрант, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

**Лю Итин**, магистрант, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

**Фу Цзячэнь**, магистрант, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

**Cong Qifeng**, Graduate Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow

**Ding Ziqi**, Graduate Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow

**Liu Yiting**, Graduate Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow

**Fu Jiachen**, Graduate Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow

### **Аннотация**

В данной статье рассматриваются последствия обработки деталей из титанового сплава с использованием методов электромеханической обработки. Сначала анализируются характеристики деталей из титановых сплавов и необходимость поверхностной закалки. Затем показаны преимущества и применимость электромеханических методов обработки. Наконец, внутренние изменения в процессе электромеханической поверхностной закалки прутка при комнатной температуре смоделированы с помощью программного обеспечения Ansys. Электромеханический метод обработки имеет преимущества низкой стоимости и широкой применимости и может быть эффективно использован для деталей из титанового сплава.

### **Annotation**

The article discusses the effects of machining titanium alloy parts using electromechanical machining methods. First the characteristics of titanium alloy parts and the need for surface hardening are analysed. Then, the advantages and applicability of electromechanical machining methods are shown. Finally, the internal changes during electromechanical surface hardening of a bar at room temperature are modelled using Ansys software. The electromechanical treatment method has the advantages of low cost and wide applicability and can be used effectively on titanium alloy parts.

**Ключевые слова:** титановые сплавы, электромеханическая обработка, поверхностное упрочнение, компьютерное моделирование.

**Keywords:** titanium alloys, electromechanical machining, surface hardening, computer modelling.

### **1. Детали из титанового сплава**

Титан, который классифицируется как "редкий" металл из-за сложного процесса выплавки и невозможности его производства в больших количествах в течение длительного периода времени. Основными характеристиками титана являются его низкая плотность, высокая механическая прочность,

простота обработки и хорошая коррозионная стойкость. Титан обладает самой высокой удельной прочностью среди всех конструкционных материалов. Хорошие механические свойства титана как конструкционного материала достигаются за счет строгого контроля соответствующих примесей и добавления легирующих элементов.

Титановые сплавы относятся к широкому спектру металлических сплавов, изготовленных из титана и других металлов. Титановые сплавы используются в основном при производстве компонентов для авиационных двигателей, работающих под давлением, а затем для структурных компонентов ракет, ракет и высокоскоростных самолетов.

Поэтому основной целью поверхностного упрочнения деталей из титановых сплавов является повышение износостойкости и снижение риска взаимного слипания деталей в условиях трения. Одновременно с повышением твердости возможно также повышение коррозионной стойкости и усталостной прочности.

## **2.Метод поверхностной закалки деталей из титанового сплава**

Распространенными методами поверхностного упрочнения деталей из титановых сплавов являются: науглероживание; азотирование; оксидирование; хромирование; упрочнение; поверхностная закалка и т.д.

В соответствии с различными методами нагрева, закалка поверхности может быть разделена на закалку поверхности индукционным нагревом, закалку поверхности пламенным нагревом, электромеханическую обработку, закалку поверхности электролитическим жидким нагревом. Данная статья посвящена применению электромеханической обработки в процессе поверхностного упрочнения титановых сплавов.

Электромеханическая обработка использует контактное сопротивление контакта (из меди или графита) и заготовки для быстрого повышения температуры контакта в условиях низкого напряжения и высокого тока. Контакты перемещаются по поверхности заготовки с определенной скоростью, при этом поверхность может быть нагрета до температуры закалки и закалена

за счет охлаждения самой заготовки. Обычно подходит для локальной поверхностной закалки крупных деталей. Он может эффективно повысить износостойкость, прочность и усталостную прочность детали.

Принцип работы заключается в том, что ток разряжается, образуя обратный ток через контактную часть и заготовку, который быстро нагревает зону контакта из-за высокого контактного сопротивления, что приводит к закалке поверхности.

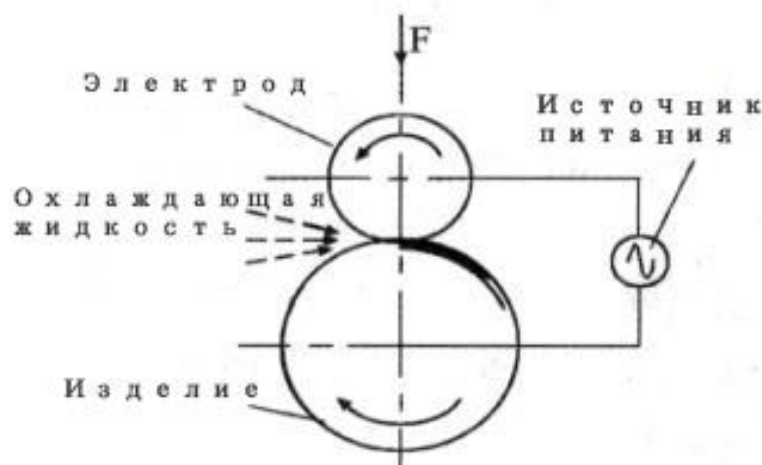


Рисунок 1. Принципиальная схема электромеханической обработки

Характеризуется: одновременным, а не последовательным термическим и механическим воздействием на поверхность детали; двумя источниками тепла на поверхности детали: внешним (за счет трения) и внутренним (за счет электрического тока); относительно небольшой продолжительностью нагрева и выдержки, зависящей от поверхности контакта и скорости работы.

### 3. Анализ моделирования

#### 3.1. Экспериментальный материал

В качестве экспериментального материала был выбран пруток из титанового сплава с внешними размерами 50 мм в диаметре и 100 мм в длину.

Обзор литературы по материалам показывает, что материал имеет плотность  $4620 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент линейного расширения  $9,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , коэффициент Пуассона 0,36 и модуль упругости  $1,1429 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ . Остальные важные физические свойства приведены в таблице 1.

Таблица 1. Таблица параметров материала

Твердость по Бринеллю	по	298-349НВ
Модуль Юнга		$9,6 \cdot 10^{10}$ Па
Модуль сдвига		$3,5294 \cdot 10^{10}$ Па
Прочность на сжатие	на	$9,3 \cdot 10^8$ Па
Прочность на разрыв	на	$9,3 \cdot 10^8$ Па
Теплопроводность		$21,9 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
Удельная теплота		$522 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

### 3.2. Выбраны параметры процесса

Ток закалки 2000-2500А, напряжение 4В, контактное давление 400Н  
 Электродмедный круг диаметром 60мм, скорость  $v=2,5$ м/мин, коэффициент Пуассона меди 0,34, модуль упругости  $1,2 \cdot 10^8$ Па . Формула расчета теплоты закалки:

$$Q = \frac{\int_0^t I^2 R dt}{K}$$

Где:

K-Коэффициент потери тепла.

R - сопротивление контактов.  $R \propto \frac{W_1+W_2}{AP}$

W1, W2 - коэффициенты контактного сопротивления заготовки и медного круга.

P - контактное давление.

A - площадь контакта.

Для упрочнения электрического контакта площадь контакта рассчитывается как:

$$A = \frac{\pi b}{2} \sqrt{4P(k_1 + k_2) * \frac{D}{2}}$$

Где:

Ширина линии обода медного колеса,  $b = 1$  мм.

$k_1, k_2$  - коэффициенты, связанные с медным колесом, коэффициентом Пуассона заготовки и модулем упругости.

$D$  - диаметр медного колеса.

Фактический процесс закалки, закалка поверхности титанового сплава при нагревании до температуры аустенизации ( $910$  °С до  $940$  °С), был в пластичном состоянии, как видно из приведенной выше формулы, теплота закалки и квадрат тока, контактное сопротивление пропорционально контактному сопротивлению и ширине линии медного колеса, диаметр, скорость связана.

### 3.3. Механизм усиления и микроструктуры

Электроконтактная закалка достигается путем нагрева поверхности заготовки за счет тепла, выделяемого контактным сопротивлением между электродом и поверхностью заготовки, при этом используется теплопроводность самой заготовки для охлаждения поверхности заготовки с целью достижения локальной закалки.

Микроструктура титанового сплава до и после закалки показана на рисунке 2:

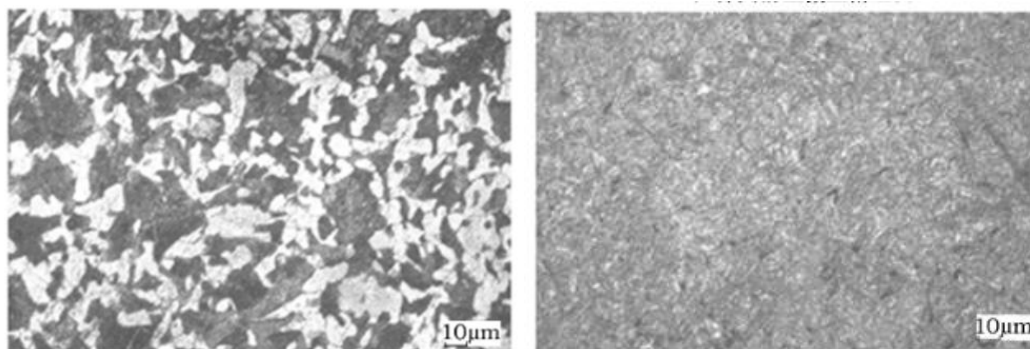


Рисунок 2. Изображение микроструктуры

После закалки деталей из титанового сплава поверхность электрического контакта в основном делится на три части: упрочняющий слой, переходный

слой и матрица. Закаленный слой подвергается воздействию самой высокой температуры, и из-за чрезвычайно быстрого нагрева и охлаждения аустенит не успевает вырасти до превращения, поэтому происходит формирование равномерно рафинированной полосовой мартенситной организации. На переходный слой влияет градиент температуры, и время удержания над точкой фазового перехода короче, а исходная организация не претерпевает полного аустенитного превращения. Матричная ткань представлена перлитом и ферритом.

### 3.4. Результаты моделирования

Как показано на рисунке 3, создается трехмерная модель заготовки и определяются свойства материала. Потом разделите сетку, чтобы получить конечно-элементную модель.

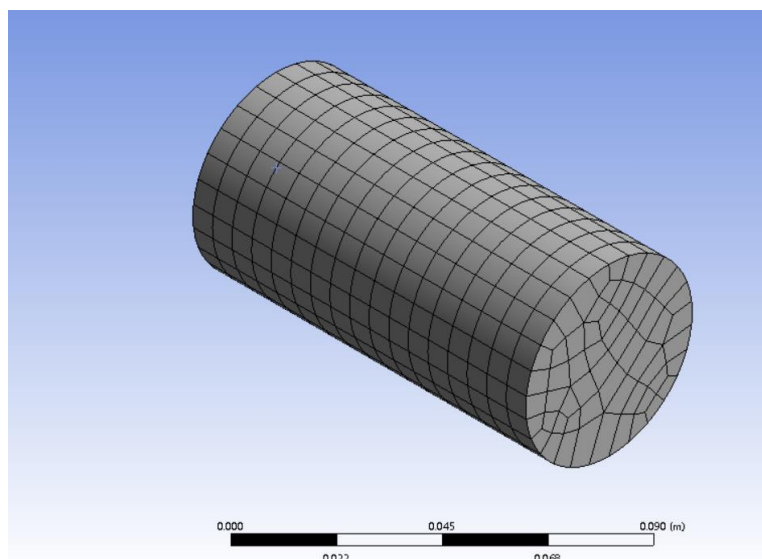


Рисунок 3. Модель конечных элементов

Когда поверхность бруса полностью нагрета, распределение температуры на поверхности показано на рисунке 4

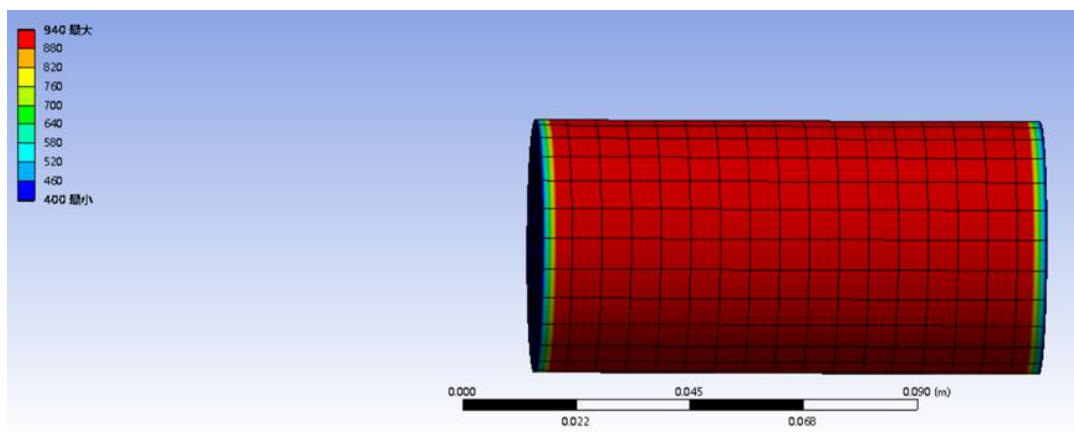


Рисунок 4. Изображение общей закалки

Изменение распределения температуры материала с течением времени в процессе закалки и охлаждения показано на рисунке 5.

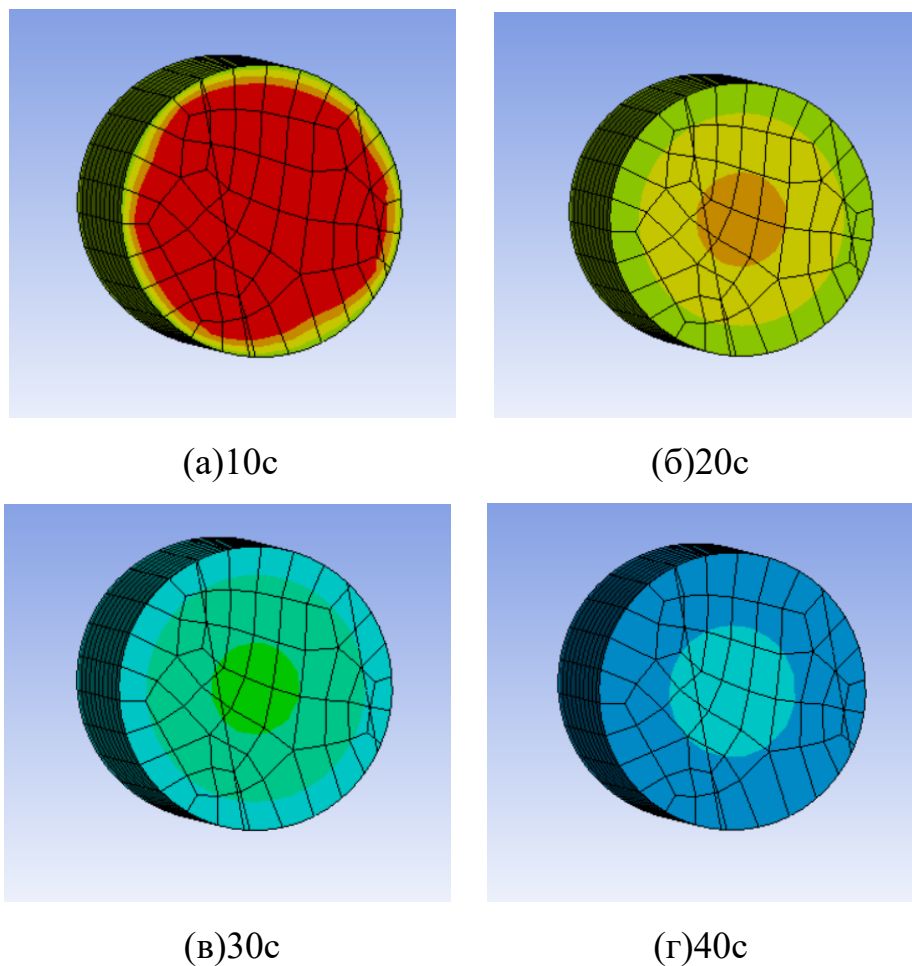


Рисунок 5. Распределение температуры во времени

#### 4.Выводы

Титановые сплавы широко используются в конструкционных компонентах благодаря своим превосходным свойствам. Для преодоления недостатков, связанных с их низкой износостойкостью, необходимо



оптимизировать компоненты из титановых сплавов путем поверхностного упрочнения. В данной статье речь идет об электромеханической обработке.

В данной статье подробно описывается метод поверхностной закалки титановых сплавов электромеханической обработкой, кратко объясняется механизм закалки и изменения в поверхностном слое титанового сплава после закалки, кроме того, на основе ansys моделируется изменение внутреннего температурного поля заготовки.

### Литература

1. Бердонос С. С. Титан // Физическая энциклопедия : [в 5 т.] / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Большая российская энциклопедия, 1994. — Т. 4: Пойнтинга — Робертсона — Стримеры. — С. 116. — 704 с. — 40 000 экз. — ISBN 5-85270-087-8.
2. Стрельченко С. С., Лебедев В. В. Соединения АЗВ5: Справочник. — М.: Металлургия, 1984. 144 с.
3. Свойства элементов: В 2 ч. Ч. 1. Физические свойства: Справочник. Под ред. Г. В. Самсонова. — М.: Металлургия, 1976. 600 с.
4. Исследование структуры среднеуглеродистых сталей после электромеханической обработки / Иванова Ю. С., Зарипов В. Н., Нго Ван Туен, Мьят Со Лвин, Йе Чжо У // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2020. - Т. 16, № 10. - С. 473-477.
5. Повышение долговечности переводников бурильных колонн электромеханической обработкой / Федорова Л. В., Федоров С. К., Иванова Ю. С., Зарипов В. Н. // Известия ВУЗов. Сер. "Машиностроение". - 2020. - № 10. - С. 38-46.
6. Повышение износостойкости стальных деталей электромеханической обработкой / Федоров С. К., Федорова Л. В., Иванова Ю. С., Карпухин С. Д. // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2017. - Т. 13, № 7. - С. 305-308.

7. Структура и износостойкость стали 65Г после электромеханической поверхностной закалки / Федорова Л. В., Федоров С. К., Иванова Ю. С., Исаев К. Р. // Технология металлов. - 2017. - № 3. - С. 27-30.

#### Literature

1. Berdonosov S. S. Titanium // Physical Encyclopedia : [in 5 vols] / Edited by A. M. Prokhorov. - M.: Great Russian Encyclopedia, 1994. - Vol. 4: Poynting-Robertson-Streamers. - С. 116. - 704 с. - 40,000 copies. - ISBN 5-85270-087-8.
2. Strelchenko S. S., Lebedev V. V. A3B5 compounds: Handbook. - Moscow: Metallurgy, 1984. 144 с.
3. Properties of elements: In 2 parts. Ч. 1. Physical properties: Handbook. Ed. by G.V. Samsonov. - Moscow: Metallurgy, 1976. 600 с.
4. Study of medium-carbon steels structure after electromechanical treatment / Ivanova Yu. - 2020. - Т. 16, № 10. - С. 473-477.
5. An increase in durability of drill-string tongs by electromechanical treatment / Fedorova L. V., Fedorov S. K., Ivanova Yu. S., Zaripov V. N. // Izvestia of Vuzov. Ser. "Mashinostroenie. - 2020. - № 10. - С. 38-46.
6. Increase of wear resistance of steel parts by electromechanical treatment / Fedorov S. K., Fedorova L. V., Ivanova Y. S., Karpukhin S. D. // Strengthening technologies and coatings. - 2017. - Т. 13, № 7. - С. 305-308.
7. Structure and wear resistance of steel 65G after electromechanical surface hardening / Fedorova L. V., Fedorov S. K., Ivanova Yu. S., Isaev K. R. // Technology of metals. - 2017. - № 3. - С. 27-30.

© Цун Цифен, Дин Цзыци, Лю Итин, Фу Цзячэнь, 2022 Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник» №5/2022.

**Для цитирования:** Цун Цифен, Дин Цзыци, Лю Итин, Фу Цзячэнь, ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА// Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник» №5/2022.