

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой, руководитель ОМ
ИШНПТ

“ ” _____ 2022 г. В.А. Клименов

**Исследование структуры и микротвердости стали после закалки
токами высокой частоты**

Методические указания по выполнению лабораторной
работы по курсу “ Технология модифицирования поверхности и нанесения
покрытий”
для студентов направления 22.03.01 — Материаловедение
и технология новых материалов

Томск 2022

УДК 620.186, 620.178

Исследование структуры и микротвердости стали после закалки токами высокой частоты: Метод. указ. по выполн. лаб. работы по курсу “Материаловедение” для студентов направления 22.03.01 —
Материаловедение и технология новых материалов — Томск: Изд. ТПУ, 2022. - с. 11.

Составитель студент группы 4БМ11 Лывзник А.В.

Рецензент к.т.н., доцент ОМ ИШНПТ Гордиенко А.И.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром ОМ ИШНПТ “___” _____ 2022 г.

Зав. кафедрой,
руководитель ОМ ИШНПТ,
д.т. н.

_____ В.А. Клименов

Общие положения:

Закалка токами высокой частоты (закалка ТВЧ) является технологией поверхностного упрочнения деталей из углеродистых сталей и чугунов и широко применяется в машиностроении. Индукционная закалка стали заключается в быстром нагреве поверхностного слоя до температуры 800...1100°C (в зависимости от марки стали) с последующим интенсивным охлаждением с поверхности водой, маслом или синтетической закалочной жидкостью [1]. Нагревание при закалке ТВЧ производят с помощью специальной индукционной установки. Индукционная установка для термообработки ТВЧ представляет собой высокочастотный генератор и индуктор для закалки ТВЧ. Закаливаемая деталь может располагаться в индукторе или возле него. Индуктор изготовлен в виде катушки, на ней намотана медная трубка. Он может иметь любую форму в зависимости от формы и размеров детали. При прохождении переменного тока через индуктор в нем появляется переменное электромагнитное поле, проходящее через деталь. Это электромагнитное поле вызывает возникновение в заготовке вихревых токов, известных как токи Фуко [4]. Такие вихревые токи, проходя в слоях металла, нагревают его до высокой температуры. Отличительной чертой индукционного нагрева с помощью ТВЧ является прохождение вихревых токов на поверхности нагреваемой детали. Так нагревается только наружный слой металла, причем, чем выше частота тока, тем меньше глубина прогрева, и, соответственно, глубина закалки ТВЧ. Это дает возможность закалить только поверхность заготовки, оставив внутренний слой мягким и вязким во избежание излишней хрупкости. Такая структура уменьшает хрупкость, повышает стойкость и надежность всего изделия, а также снижает энергозатраты на нагрев всей детали. Причем можно регулировать глубину закаленного слоя, изменяя параметры тока. После нагревания деталей происходит охлаждение — второй важный этап процесса закалки, от его скорости и равномерности зависит качество и

твердость всей поверхности. При этом полиморфные превращения происходят послойно, в зависимости от степени достижения критической температуры, влияющей на формирование новой кристаллической структуры [1].

В итоге происходит изменение по следующим зонам [1]:

- Верхняя, подвергшаяся упрочнению.
- Промежуточная, закаленная частично. Ее еще называют зоной термического влияния.
- Область пониженной твердости.
- Внутренняя часть, не подвергшаяся изменениям.

При данном виде обработки доэвтектоидные стали (сталь с углеродом меньше 0,4% не закаливают из-за получаемой низкой твердости), с содержанием углерода 0,4 до 0,8 % нагревают немного выше температуры фазового превращения перлита и феррита в аустенит. Это происходит в интервале 800—850 °С [2]. Затем заготовку быстро охлаждают. При резком остывании аустенит превращается в мартенсит, который обладает высокой твердостью и прочностью. Малое время выдержки позволяет получить мелкозернистый аустенит и мелкоигльчатый мартенсит, зерна не успевают вырасти и остаются маленькими. Такая структура стали обладает высокой твердостью и одновременно низкой хрупкостью. Заэвтектоидные стали нагревают чуть ниже, чем доэвтектоидные, до температуры 750—800 °С, то есть производят неполную закалку. Это связано с тем, что при нагреве до этой температуры кроме образования аустенита в расплаве металла остается нерастворенным небольшое количество цементита, обладающего твердостью высшей, чем у мартенсита. После резкого охлаждения аустенит превращается в мартенсит, а цементит остается в виде мелких включений. Также в этой зоне не успевший полностью раствориться углерод образует твердые карбиды.

Основные характеристики процесса:

Получаемая твердость изделия 58-62 HRC. Температура процесса 800 – 1100 °С. Частота тока 0,5 – 100 КГц. Время заковки ТВЧ 10 секунд [5].

Цель работы: изучить влияние поверхностной обработки (заковки токами высокой частоты) на формирование структуры и свойства малолегированной стали.

Материалы и оборудование для выполнения лабораторной работы:

В лабораторной работе будут исследованы две стали, отличающиеся химическим составом:

1. Сталь 27ГС - сталь конструкционная низколегированная для сварных конструкций (Рис. 1).

Характеристика материала 27ГС								
Марка :	27ГС							
Классификация :	Сталь конструкционная для сварных конструкций							
Применение:	изготовление арматуры периодического профиля класса Ат600С (Ат-IVС), предназначенной для армирования железобетонных конструкций							
Зарубежные аналоги:	Нет данных							
27ГС: купить Auremo ООО www.auremo.org Поставщик: Санкт-Петербург +7 (812) 680-16-77 , Днепр +380 (56) 790-91-90, info [a] auremo.org								
Виды поставки материала 27ГС								
В22 - Сортовой и фасонный прокат ГОСТ 10884-94;								
Химический состав в % материала 27ГС								
ГОСТ 10884 - 94								
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0.24 - 0.3	1 - 1.5	0.9 - 1.3	до 0.3	до 0.045	до 0.045	до 0.3	до 0.3	до 0.08
Механические свойства при T=20°C материала 27ГС .								
Сортамент	Размер	Напр.	σ_b	σ_T	δ_5	ψ	KCU	Термообр.
-	мм	-	МПа	МПа	%	%	кДж / м ²	-
Арматура, ГОСТ 10884-94	Ø 10 - 40		800	600	12			

Рисунок 1 – Стандартные характеристики стали 27ГС.

2. Сталь 50Г - сталь конструкционная, легированная для изготовления валов, шестерней, коленвалов дизелей и газовых двигателей, и других деталей, к которым предъявляются требования повышенной прочности и износостойкости (Рис. 2).

Характеристика материала 50Г

Марка :	50Г
Заменитель:	40Г, 50
Классификация :	Сталь конструкционная легированная
Дополнение:	Сталь марганцовистая
Применение:	Диски трения, валы, шестерни, шлицевые валы, шатуны, распределительные валики, втулки подшипников, кривошипы, шпиндели, ободы маховиков, коленвалы дизелей и газовых двигателей и другие детали, к которым предъявляются требования повышенной прочности и износостойкости.
Зарубежные аналоги:	Известны
50Г: купить Ауремо ООО www.auremo.org Поставщик: Санкт-Петербург +7 (812) 680-16-77 , Днепр +380 (56) 790-91-90, info [a] auremo.org	

Виды поставки материала 50Г

V22 - Сортовой и фасонный прокат	ГОСТ 9234-74; ГОСТ 2879-2006; ГОСТ 2591-2006; ГОСТ 2590-2006; ГОСТ 11474-76; ГОСТ 1133-71;
V23 - Листы и полосы	ГОСТ 103-2006; ГОСТ 19903-74; ГОСТ 82-70;
V32 - Сортовой и фасонный прокат	ГОСТ 8560-78; ГОСТ 8559-75; ГОСТ 7417-75; ГОСТ 4543-71; ГОСТ 14955-77; ГОСТ 1051-73;
V33 - Листы и полосы	ГОСТ 1577-93;
V34 - Ленты	ГОСТ 2283-79; ГОСТ 10234-77;

Химический состав в % материала 50Г [ГОСТ 4543 - 71](#)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.48 - 0.56	0.17 - 0.37	0.7 - 1	до 0.3	до 0.035	до 0.035	до 0.3	до 0.3

Температура критических точек материала 50Г.

$A_{c1} = 723$, $A_{c3}(A_{cm}) = 760$, $A_{r3}(A_{rcm}) = 740$, $A_{r1} = 680$, $M_n = 320$

Технологические свойства материала 50Г .

Свариваемость:	трудносвариваемая.
Флокеночувствительность:	чувствительна.
Склонность к отпускной хрупкости:	склонна.

Механические свойства при T=20°C материала 50Г .

Сортамент	Размер	Напр.	σ_b	σ_T	δ_5	ψ	KCU	Термообр.
-	мм	-	МПа	МПа	%	%	кДж / м ²	-
Прутки, ГОСТ 4543-71	∅ 25		650	390	13	40	390	Закалка и отпуск
Лента отожжен., ГОСТ 2283-79			640-740		10-15			
Лента нагартован., ГОСТ 2283-79			740-1180					

Твердость 50Г после отжига , ГОСТ 4543-71	HB 10 ⁻¹ = 229 МПа
Твердость 50Г нормализованного , Лист толстый ГОСТ 1577-93	HB 10 ⁻¹ = 255 МПа
Твердость 50Г после отжига , Лист толстый ГОСТ 1577-93	HB 10 ⁻¹ = 217 МПа

Рисунок 2 – Стандартные характеристики стали 50Г.

Закалка токами высокой частоты была выполнена для пальца звена гусеничного трактора (Рис. 3). Палец — деталь машины или механизма, длиной более одного и до трёх диаметров. В сборке несущие другие детали, сборочные единицы устанавливаются на нём шарнирно или неподвижно или опираются на один конец или оба конца [3].



Рисунок 3 – Палец звена гусеничного трактора до эксплуатации

На основе анализа взаимодействия деталей трибосопряжения, характера износа и формы изношенных пальцев гусениц сельскохозяйственных тракторов их поверхность условно разделена на три характерные зоны. В центральной зоне проявляется коррозионно-абразивное изнашивание, а в крайних зонах — абразивное и механическое изнашивание, также в крайних зонах деталь подвергается интенсивной пластической деформации (Рис. 4, [3]).

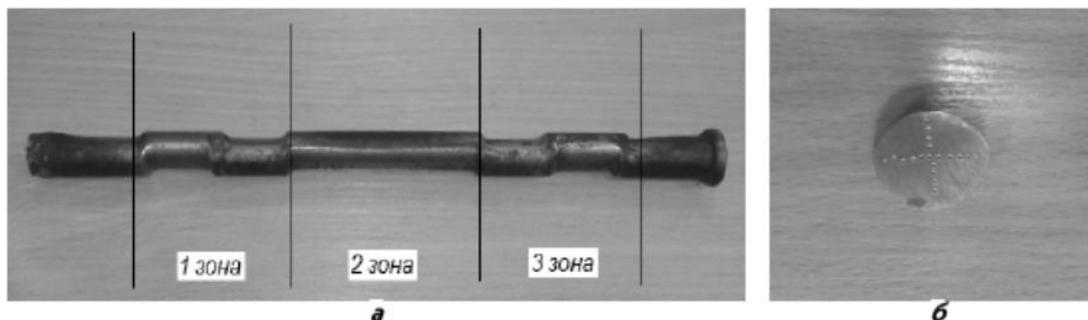


Рисунок 4 – Вид фигуры износа пальца с обозначением зон (а) и профиль его сечения (б).

Оборудование для выполнения работы:

1. Шлифование и полировка образцов выполняется вручную, либо на шлифовальной машине (Рис. 5). Перед работой необходимо ознакомиться с инструкцией по ее эксплуатации.



Рисунок 5 – Шлифовальная машина

2. Микроанализ проводят на оптическом микроскопе комплексе 101040020638/001 (Рис. 6). Перед работой необходимо ознакомиться с инструкцией по эксплуатации данного прибора).



Рисунок 6 – Оптический микроскоп

3. Измерение твердости образцов методом Роквелла проводят на Твердомере ТК- "М N1916 (Рис. 7). Перед работой необходимо ознакомиться с инструкцией по эксплуатации данного прибора).



Рисунок 7 – Твердомер ТК- "М N1916.

Выполнение работы:

Каждому студенту выдается по образцу, вырезанному из пальца звена гусеничного трактора. Исследования производятся следующим образом:

1. Выбранную плоскость поверхности образца шлифуют на абразивной бумаге (наждачной шкурке) с зернами различных размеров. Шлифование начинают на шкурке с более крупными абразивными зернами. Затем переходят на шкурку с более мелким абразивным зерном. Образец подготовленной поверхностью прижимают рукой к шлифовальной шкурке и водят им по ней в направлении, параллельной к рискам, полученным после отпиливания напильником. Шлифуют до полного исчезновения рисок, после этого поверхность образца протирают ватой (или промывают водой) и шлифуют на шкурке с более мелким абразивным зерном до полного исчезновения рисок, полученных из предыдущего шлифования.

2. Оставшиеся после шлифования мелкие риски на поверхности образца удаляют полированием. При этом обрабатываемая поверхность образца приобретает зеркальный блеск. Полирование выполняется алмазной пастой (с дисперсностью частиц – 0/1 мкм), которую наносят на сукно.

3. Далее производится травление подготовленной поверхности образца. Образец держат в левой руке полированной поверхностью вверх, на поверхность наносится небольшое количество травителя так, чтобы травитель быстро разлился и покрыл полированную поверхность. Сущность процесса выявления структуры металлов и сплавов травлением заключается в различной степени растворения или окрашивания отдельных структурных составляющих - зерен металлов, твердых растворов, химических соединений. Поверхность шлифа сплава, погруженного в реактив, представляет собой многоэлектродный гальванический элемент, состоящий из большого числа микроскопических электродов. Структурные элементы сплава, которые имеют наиболее электроотрицательный электродный потенциал, играют роль микроскопических анодов и растворяются, образуя впадины на поверхности образца, а участки, являющиеся катодами, остаются неизменными. Таким образом, в результате травления на поверхности образца образуются выступы и впадины, характеризующие микроструктуру сплава. Травление проводится спиртовым раствором азотной кислоты (реактивом Рженотарского).

4. После травления образца производится микроструктурный анализ. Микроанализ - изучение строения поверхностей шлифованных, полированных и протравленных образцов - микрошлифов с помощью металлографических оптических микроскопов при увеличениях обычно от $\times 100$ до $\times 1000$. С помощью микроанализа необходимо определить следующие параметры:

- форму и размеры зеренной структуры в разных зонах образца, подвергнутого закалке ТВЧ (обработанной зоне, зоне термического влияния и основном материале);
- наличие микродефектов металла;
- присутствие различных фаз;
- оценить ширину обработанной зоны и зоны термического влияния.

5. Следующим шагом работы является измерение микротвердости металла методом Роквелла. Измерение производилось для закаленной зоны, зон термического влияния и незакаленной сердцевины детали. Сущность метода определения твердости по Роквеллу заключается во внедрении индентора в испытуемый образец, с измерением глубины отпечатка во время испытания.

Содержание отчета по работе:

Оформление отчета по лабораторной работе должно быть выполнено в редакторе MS Office в соответствии с требованиями СТП ТПУ 1.5.01-2006.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1) Изображения и описание полученных структур для закаленной части образца, зон термического влияния и незакаленной сердцевины детали, включая:

- оценку размеров зон;
- аттестацию фазового состояния в каждой зоне;
- оценка изменения размеров элементов структур.

2) Результаты измерения микротвердости в разных сечениях образца после поверхностной закалки.

3) Сопоставление полученных результатов со стандартными характеристиками исследуемой стали.

4) Выводы по результатам выполненной работы о влиянии закалки ТВЧ на изменение структуры и микротвердости изученных образцов.

Контрольные вопросы:

1. Что включают в себя индукционная установка для термообработки ТВЧ?
Опишите процесс термообработки ТВЧ.
2. Отличительная черта индукционного нагрева с помощью ТВЧ?

3. Какие температуры нагрева выбирают при закалке ТВЧ заэвтектоидных сталей при?
4. Какие характерные зоны можно выделить при закалке ТВЧ?
5. Какая образуется структура при закалке ТВЧ доэвтектоидных сталей (содержание углерода 0,4 до 0,8 %)? Какими характеристиками обладает такая структура?

Список литературы:

1. Гуляев А.П. Термическая обработка стали, изд. 2-е, Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, Москва 1960, 363 – 377 с.
2. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов 6-е издание перераб. и доп. М.; Металлургия, 1986, 314 с.
3. Лялякин В.П., Аулов В.Ф., Ишков А.В. Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 7 (141), 2016 г. «Особенности изнашивания пальцев гусеничных сельскохозяйственных тракторов и специальных машин с открытыми металлическими шарнирами» .
4. <https://stankiexpert.ru/spravochnik/materialovedenie/zakalka-tvch.html>- электронный ресурс.
5. <https://m-deer.ru/tehnologiya/zakalka-metallov-tokami-vysokoj-chastoty.html>- электронный ресурс.