

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-технологический институт

Кафедра технического сервиса

Михальченков А.М., Феськов С.А.

Термоупрочнение стальных деталей

Учебное пособие для выполнения лабораторных работ
по дисциплине «Материаловедение и технология конструкционных материалов»
для студентов очной и заочной форм обучения высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 Агроинженерия

УДК 621.78 (07)

ББК 34.64

М 69

Михальченков, А. М. **Термоупрочнение стальных деталей:** учебное пособие для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Материаловедение и технология конструкционных материалов» для студентов очной и заочной форм обучения высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 Агроинженерия / А. М. Михальченков, С. А. Феськов. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2023. – 56 с

Учебное пособие к лабораторным работам по дисциплине «Материаловедение и технология конструкционных материалов» предназначено для студентов очной и заочной форм обучения высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 и Агроинженерия.

Рецензенты:

д.т.н., профессор кафедры общетехнических дисциплин и физики, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет» Ю.Е. Кисель

д.т.н., профессор кафедры профессор кафедры ТОЖиПП, ФГБОУ ВО Брянский государственный аграрный университет А.И. Купреенко.

Рекомендовано к изданию методической комиссией инженерно-технологического института Брянского ГАУ, протокол № 2 от 28 сентября 2023 г.

© Брянский ГАУ, 2023

© Михальченков А.М., 2023

© Феськов С.А., 2023

Введение

Интенсификация процессов при производстве сельскохозяйственной продукции повысило уровень требований к техническим средствам и непосредственно к деталям, испытывающим высокие статические и динамические нагрузки, а так же подвергающихся абразивному изнашиванию высокой интенсивности. Рост эксплуатационных показателей, и в частности скоростей перемещения агрегатов различного функционального назначения, привело к необходимости обеспечения должного ресурса деталей, а так же их долговечности. В связи с этим инженерная служба АПК России, ученые, работники ВУЗов и НИИ соответствующих профилей, вынуждены обратиться к методам упрочнения конструктивных элементов рабочих органов сельскохозяйственных машин связанных с термической обработкой. Между тем, курс материаловедения, преподаваемый на инженерных факультетах аграрных ВУЗов, ограничен количеством лабораторных работ и недостаточным научным уровнем существующей методической базы. Поэтому авторы сочли целесообразным подготовить данное учебное пособие, которое предполагает наличие расширенной информации по вопросам термообработки и термоупрочнения деталей изготовленных из сталей. Структура лабораторных работ так же претерпела существенные изменения, меняющие практическую направленность. Проведенные мероприятия позволят существенно расширить уровень студентов в отношении вопросов термической обработки.

Краткие сведения о термоупрочнении деталей из углеродистых сталей

Общие сведения о термоупрочнении

Среди большого количества способов повышения ресурса деталей, изготовленных из стали, особое место занимает упрочняющая термическая обработка [1]. Это связано с отсутствием сложных операций при выполнении технологии и так же достаточно высокой экономической эффективностью, по сравнению с другими методами повышения механических свойств изделий.

Термическая обработка основана на структурных изменениях, связанных с нагревом металлического тела выше температур фазовых превращений и последующим охлаждением со скоростью выше критической [2] - получила название закалка. Её результатом является улучшение ряда механических свойств [3], в том числе и повышение твердости (H). В свою очередь рост твердости способствует увеличению ресурса деталей, особенно эксплуатирующихся в условиях абразивного износа [4]. Термоупрочнение (ТУ), исходя из многочисленной информации, имеет достаточно большое количество разновидностей.

Деление методов ТУ следует основывать, базируясь на условиях эксплуатации детали и прежде всего вероятности её катастрофического разрушения. Поэтому классификация должна заключаться в воздействии тепловой энергии на поверхность или на всю глубину обрабатываемого изделия или его части. Тогда термоупрочнение можно рассматривать как поверхностное и объёмное (полное) на всю глубину.

Поверхностное термоупрочнение (закалка)

Такой вид термообработки заключается в образовании твердой структуры только в поверхностных слоях детали, что обуславливается высокой скоростью их

нагрева за пределы фазовых превращений и последующего охлаждения со скоростью выше критической [5].

При такой закалке высокую твердость приобретает поверхность детали, толщиной от 0,1 (лазерная закалка) до 20 мм (индукционная закалка). Нередко подобное термоупрочнение оказывается эффективнее, чем сквозная закалка по всему объему [6]. Например, вследствие воздействия ударных нагрузений поверхностно-термоупрочненная деталь не разрушается, благодаря сохранению пластичной сердцевины, позволяющей гасить энергию удара, что невозможно при объемной закалке. Другими положительными факторами следует считать снижение энергетических и экономических затрат на проведение ТУ, а также обеспечение заданных свойств только поверхностным объёмам на отдельных наиболее нагруженных участках изделия. Отмеченное, особенно важно при упрочнении деталей сельскохозяйственной техники, которые как правило имеют разный уровень нагружения в отдельных частях.

Виды поверхностного термоупрочнения различаются способами подвода тепла к изделию [6]. Первый - тепло передается через поверхность от внешнего нагревателя. Второй - тепло появляется внутри металла вследствие действия электромагнитного поля. Охлаждение может производиться водным или масляным душем, а также растворами органических и неорганических соединений, не исключаются.

Классификация видов и способов поверхностной закалки представлена в виде схемы на рисунке 1.

Индукционный нагрев происходит вследствие теплового действия тока, индуктируемого внутри самого изделия, помещенного в переменное магнитное поле [7]. В течение короткого промежутка времени упрочняемая поверхность детали глубиной 2 - 20 мм претерпевает фазовые превращения [7]. Из-за высоких скоростей нагрева и охлаждения поверхностных слоев образуется мартенситная составляющая с 58 - 62HRC в структуре, расположенной непосредственно у поверхности. За областью преобладания мартенсита структура представляет собой троостит (38...48HRC) и сорбит (25...38HRC). Толщина закаленного слоя зависит

от параметров режима термообработки. Преимущества метода - отсутствие обезуглероживания и окисления поверхности детали, высокая производительность, возможность регулирования и контроля режима ТО, а также автоматизации процесса.



Рисунок 1 – Классификация методов поверхностной закалки по способу нагрева

К недостаткам следует отнести сложность регулирования температуры нагрева без использования автоматических систем, приводящая к неравномерности прогрева обрабатываемого участка детали и сильному её перегреву. Применение способа также ограничивается определенной номенклатурой изделий, сложностью оборудования, дороговизной процесса и нередко невозможностью и нецелесообразностью использования на ремонтных предприятиях при восстановлении деталей.

Способ контактного нагрева заключается в том, что при прохождении тока, от электрода к соприкасающейся с ним детали в месте контакта, благодаря значительной плотности тока происходит быстрый нагрев поверхностного слоя

[8]. При этом изделие перемещается под контактными роликами и на нем образуется нагретая полоска, при охлаждении которой формируется закаленный слой. Глубина ТУ и другие показатели определяются: плотностью тока и скоростью перемещения детали под электродом [8]. Метод обеспечивает глубину ТО, равную 2 - 3 мм с твердостью 56 - 62HRC и мартенситной структурой. Использование возможно только для деталей несложной конфигурации. Данный способ фактически не нашел применения в силу следующих отрицательных факторов: 1 – низкая производительности; 2 - неоднородности степени закалки на локальных участках; 3 - узкой номенклатуры деталей. Более того, при проведении термоупрочнения деталей с достаточно сложной конфигурацией метод не приемлем.

Закалку газопламенным нагревом используют, когда другие методы неприменимы, например, для крупных изделий [9]. Поверхность детали нагревают газовым пламенем ($t = 2400 - 3150$ °С). Последующее быстрое охлаждение обеспечивает закалку на глубину 2...4 мм с твердостью 50...56 HRC. В тонком поверхностном слое образуется мартенсит, а в нижележащих объемах - троостомартенсит. В настоящее время газопламенная закалка вытеснена более прогрессивными методами. Недостатками считаются: трудность регулирования температуры нагрева, а следовательно, глубины закаленного слоя; высокая вероятность перегрева; возможность частичного подплавления нагреваемой области; образование участков отпуска при закалке крупногабаритных изделий; трудность автоматизации процесса низкая производительность.

Сущность плазменной термообработки состоит в высокоскоростном нагреве потоком плазмы поверхностного слоя металла и быстрым его охлаждением [10]. На поверхности деталей образуется термоупрочненный слой с 50 – 64 HRC и толщиной до 3,5 мм с наличием мартенсита и зонами отпуска сорбитного типа. Способ обладает высокой производительностью, возможностью плавного регулирования параметров режима процесса закалки и позволяет обрабатывать детали без принудительного охлаждения, за исключением изделий малого размера. Недостатки: 1 - необходимость тщательной зачистки поверхности; 2 - при

перекрытии закаленных участков могут образовываться зоны отпуска; 3 - сложность оборудования и реализации процесса; 4 - необходимость обеспечения высокой технологичности при выполнении нагрева. Достоверных сведений о его использовании при выполнении восстановительных, связанных с термообработкой работ в известных источниках не обнаружено.

Лазерное термоупрочнение основано на трансформации световой энергии генераторов света оптического диапазона в тепловую [11]. Кратковременное воздействие лазерного излучения (до 10^{-8} с) вызывает разогрев небольшого объема металла (до 6 - 12 мм в диаметре и 1,5...4,5 мм в глубину), который закаливается вследствие быстрого отвода теплоты в металл. Упрочненный слой имеет мартенситную структуру твердостью до 65HRC с сорбитно-трооститными участками. Способ достаточно производителен и позволяет обрабатывать детали сложной конфигурации. Однако при перекрытии закаленных полос образуются зоны отпуска, негативно сказывающиеся на однородности структуры. Другими недостатками метода являются: плохое поглощение длинноволнового света сталями, что приводит к необходимости нанесения дополнительного покрытия, позволяющего увеличить процент поглощенной мощности; низкое КПД и большое потребление энергии. Применение метода для упрочнения конструктивных элементов с.х. орудий не целесообразно вследствие трудностей технологического и экономического плана.

Закалка в электролите основана на физическом явлении, называемом «эффектом катода» [12], связанным с сильным возрастанием сопротивления и нагреванием изделия до температур около 2000 °С. Нагрев производится в течение нескольких секунд. Толщина закаленного слоя при этом составляет 2 - 5 мм, твердость - до 54...60 HRC. При реализации способа возникают трудности регулирования процесса нагрева. Детали крупных размеров не поддаются подобной закалке. Необходимо четко поддерживать неизменным состав и температуру электролита, плотность тока, а также продолжительность выдержки изделия.

Нагрев изделий при закалке в расплавленных металлах или солях [13], осуществляется путем их погружения в расплавы с температурой, на 100 - 200 °С

превышающей температуру закалки. Вследствие перегрева температура поверхностного слоя стали превышает критическую, и при быстром охлаждении на ней образуется мартенсит.

Способ применяется при термоупрочнении малонагруженных мелких деталей простой геометрической формы. Указанный недостаток, а также низкая экологичность фактически сводят на «нет» возможности использования метода.

Таким образом, поверхностная закалка достаточно эффективный широко распространенный метод повышения твердости поверхностного слоя изделия при сохранении вязкой сердцевины, что обеспечивает увеличенную способность деталей сопротивляться ударным нагрузкам. Применение этих способов нельзя рекомендовать для элементов машин, работающих в условиях абразивного изнашивания высокой интенсивности. Наличие сложного оборудования и высокие технологические требования к процессу сдерживают, а нередко делают нецелесообразным применение поверхностного ТУ в небольших предприятиях и в частности ремонтном производстве.

Объемная закалка (закалка на всю глубину)

Объемная закалка является универсальным методом обработки стали и используется, когда необходимо получить высокую твердость по всему сечению детали [14]. Такой технологический подход обеспечивает постоянное на всём протяжении эксплуатации детали сопротивление абразивному изнашиванию [15]. Существует несколько видов классификаций этого способа: в зависимости от структуры (для доэвтектоидных сталей рекомендуется применять полную закалку, для заэвтектоидных - неполную); характера обрабатываемой детали (геометрия, материал); твердости, которую необходимо получить; условий охлаждения.



Рисунок 2 – Способы объёмной закалки в зависимости от условий охлаждения

Как известно, определяющим фактором при закалке являются условия охлаждения нагретого выше температур фазовых превращений металлического тела, поэтому предлагаемая классификация опирается на вышеуказанный признак.

Методы закалки можно разделить на технологии без смены охладителя и со сменой охладителя (рисунок 2).

Методы закалки без смены охладителя

Термоупрочнение в одном охладителе (непрерывная закалка) [16] - при котором нагретое и выдержанное с температуры закалки $t_{\text{п}} \text{ } t_{\text{к}}$ остывает до температуры охлаждающей среды. Способ не требует сложного оборудования и высоких профессиональных навыков исполнителей, технологически несложен и легко подвергается автоматизации. Применяется для деталей простой формы из углеродистых и низколегированных сталей. В ряде случаев такая закалка вызывает коробление и разрушение деталей в процессе работы. Во избежание этого? дополнительно проводят отпуск. Метод широко используется на предприятиях

различной формации при термоупрочнении широкого спектра стальных деталей. В тоже время, технологии, базирующиеся на термоупрочнении в одном охладителе должны учитывать специфику производства. Прежде всего, сказанное выше характерно при термической обработки деталей сельскохозяйственной техники особенно подтверждающихся абразивному нагружению.

Струйчатая закалка (местная) заключается в обрызгивании детали интенсивной струей воды и применяется, когда требуется закалить часть изделия [17]. Она может сопровождаться самоотпуском. Технологию используют для закалки деформирующего инструмента, рабочая поверхность которого должна иметь структуру мартенсита. Данный способ при больших объемах обработки экономически нецелесообразен и сложен технологически, поэтому его использование не всегда рационально.

Закалка под давлением применяется для предотвращения деформации, осуществляется при зажатии заготовок в штампах или на закалочных прессах [20] и предназначена для специальных целей. Применяется крайне редко и на специализированных предприятиях.

Закалка в магнитном поле заключается в комбинированном термомагнитном воздействии на упрочняемую деталь [18] и может проводиться: нагревом постоянным током; нагревом переменным током. Такую обработку целесообразно использовать при поштучной обработке изделий из инструментальных сталей. Чрезмерно сложное оборудование и специальные условия проведения процесса не позволяют рекомендовать способ для широкого распространения.

Рассмотрение технологий объемной закалки показывает, что наибольшими возможностями для упрочнения деталей эксплуатирующихся в условиях абразивного изнашивания при их изготовлении и восстановлении обладает термообработка в одном охладителе,

Методы закалки со сменой охладителя

Закалка в двух средах (прерывистая закалка) [19] состоит в том, что детали охлаждают последовательно в двух средах - вначале с большей, а затем, незадолго до начала мартенситного превращения, с меньшей охлаждающей способностью. Это необходимо чтобы в процессе охлаждения не произошло выпадения феррито-цементитной смеси в интервале температур 500 - 600 °С. В дальнейшем высокая скорость охлаждения для окончания мартенситного превращения не требуется. Метод позволяет избежать операции отпуска и появления закалочных дефектов. Применяется для закалки инструментов из легированных и высокоуглеродистых сталей, отличается сложностью и требует достаточно высокой квалификации персонала.

При *закалке с подстуживанием* нагретое до температуры мартенситного превращения изделие не сразу погружают в закалочную жидкость, а некоторое время выдерживают на воздухе для того, чтобы после окончательного охлаждения в сердцевине образовалась троосто-сорбитная структура. Способ ограничен применением для высоколегированных сталей, а также для деталей несложной конфигурации.

Ступенчатая закалка [19] осуществляется путем переноса изделия после нагрева и выдержки при температуре закалки в жидкий расплав солей или щелочей с температурой выше начала мартенситного превращения (180 - 250 °С). После небольшой выдержки для выравнивания температуры по всему сечению детали окончательное охлаждение производят на воздухе, в масле и даже в воде. Это обеспечивает образование мартенситной структуры по всему объему с наличием аустенитной составляющей. Метод применяется для высокоуглеродистых, хромистых сталей и отличается технологической сложностью.

Изотермическая закалка [17] - разновидность ступенчатой закалки, при которой начальное охлаждение осуществляется в соляных ваннах, расплавах металла реже - в воде и масле с длительной выдержкой до образования троостита

или нижнего бейнита. Окончательное охлаждение проводят на воздухе. Применяется для изготовления инструментов из углеродистых и легированных сталей, для деталей с сечением до 10 мм или сложной конфигурации, склонных к образованию короблений.

Горячая закалка. Такая закалка проводится аналогично ступенчатой, но температура горячей охлаждающей среды устанавливается ниже температуры начала мартенситного превращения, в пределах 110 - 160 °С, чем обеспечивается снижение скорости охлаждения, в силу чего уменьшаются внутренние напряжения и коробление детали. Горячую закалку применяют для изделий из углеродистых сталей с размерами сечения до 40 мм. Широкого распространения данная технология не получила.

Светлая закалка. Этот способ термической безокислительной и безуглежаряживающей обработки [19], который применяется для закалки деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок и не подвергающихся финишной обработке. Осуществляется с нагревом в расплавах нейтральных солей и безокислительных атмосфер, а также в вакуумных печах и последующим охлаждением в растворах едких щелочей. Такой вид закалки используется в специальных случаях, весьма сложен технологически.

Закалка с самоотпуском [19] - нагретое изделие выдерживают в закалочной среде не до полного охлаждения. После извлечения изделия его поверхностные слои повторно нагреваются за счет внутренней теплоты, то есть осуществляется самоотпуск. При таком методе сердцевина изделия закалке почти не подвергается и будет иметь более низкую твердость, чем поверхностные слои. Используется для инструмента, работающего с ударными нагрузками, у которого высокая твердость поверхностных слоев сочетается с повышенной вязкостью сердцевины.

Закалку с купанием можно считать разновидностью закалки с самоотпуском. Изделие сначала погружают в жидкую закалочную среду, а затем периодически вынимают на воздух [20], что способствует выравниванию температуры

по сечению изделия и уменьшению внутренних напряжений. Технология ограничена и проводится для массивных деталей.

Технологические варианты термоупрочнения со сменой охладителя могут быть ограниченно применимы для повышения износостойкости изделий из-за технологической сложности и специфического назначения.

Объемно-поверхностная закалка

Там, где эффективность поверхностного ТУ невысока, применяется другой метод - *объемно-поверхностная закалка (закалка при глубоком нагреве)* [21]. Она распространяется на стали с небольшим содержанием легирующих элементов. Вследствие интенсивного охлаждения скорость остужения поверхности гораздо выше, чем внутри, поэтому глубокие объемы испытывают превращения с образованием троостита и сорбита, а поверхностные слои соответственно мартенсита. Результат обеспечивает получение деталей, сочетающих высокую твердость (62HRC) поверхностного слоя с повышенной твердостью (30 - 45HRC). Однако нестабильность результатов, выражающаяся в образовании мягких пятен, ограничивает распространение метода.

Лабораторная работа №1

Термическая обработка углеродистых сталей (отжиг, нормализация, закалка). Влияние температуры нагрева на механические свойства углеродистых сталей при закалке

Цель работы: ознакомиться с основами и видами термической обработки стали. Изучить влияние температуры нагрева при закалке на твердость углеродистой стали.

Применяемое оборудование, материалы, инструмент: муфельная печь; твердомер Роквелла; закалочный бачок; щипцы; образцы отожженных и нормализованных углеродистых сталей; штангенциркуль; наждачная бумага.

1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Общие положения термической обработки сталей

Термической обработкой называют совокупность операций теплового воздействия на материалы с целью изменения их структуры и свойств в нужном направлении. Заключается в нагреве до определенной температуры, выдержке при этой температуре и последующем охлаждении с заданной скоростью.

Термическая обработка – один из распространенных и эффективных способов изменения структуры и свойств сталей, обусловленных протеканием различных фазовых превращений в неравновесном состоянии без изменения химического состава.

Данный вид обработки может быть как промежуточной операцией, предназначенной для улучшения технологических свойств, так и окончательной – для обеспечения в материале или изделии требуемого комплекса механических свойств.

Этому технологическому воздействию подвергают слитки, отливки, полуфабрикаты, сварные соединения, детали машин и инструменты.

Основными видами термической обработки являются: *отжиг, нормализация, закалка, отпуск*.

Тепловое воздействие может сочетаться с деформационным: *термомеханическая обработка* и химическим: *химико-термическая обработка*. К разновидностям термической обработки также относят: *старение, патентирование, обработку холодом, электротермическую и термомагнитную обработки*.

На практике различают *предварительную* термическую обработку углеродистой стали (*отжиг, нормализация*), целью которой является подготовка структуры к последующим технологическим воздействиям, и *конечную*, сообщаящую материалу нужную структуру и заданные свойства (*закалка в сочетании с отпуском*). В настоящей лабораторной работе рассматриваются: отжиг, нормализация и закалка.

Принадлежность к тому или иному виду термической обработки определяется типом структурных изменений, происходящих при этом в материале (металле или сплаве).

Основными процессами, происходящими при термической обработке сталей, являются фазовые превращения в неравновесном состоянии, важнейшими из которых являются:

- превращение аустенита в перлит при охлаждении ($A \rightarrow P$);
- превращение перлита в аустенит при нагреве ($P \rightarrow A$);
- превращение аустенита в мартенсит при быстром охлаждении ($A \rightarrow M$);
- распад мартенсита при отпуске закаленных сталей ($M \rightarrow \Phi + Ц$)

Технологические процессы термической обработки связаны с существованием критических температур фазовых превращений в сталях (критические точки). В практике термической обработки углеродистых сталей в соответствии с диаграммой состояния Fe–Fe₃C принято следующее обозначение *критических точек* (рисунок 1, индекс с – температура при нагреве):

- эвтектоидная температура – A_{C1} (линия PS);
- критические точки, соответствующие превращению аустенита в феррит – A_{C3} (линия GS);
- линия, обозначающая изменение растворимости углерода в аустените – $A_{Cст}$ (SE).

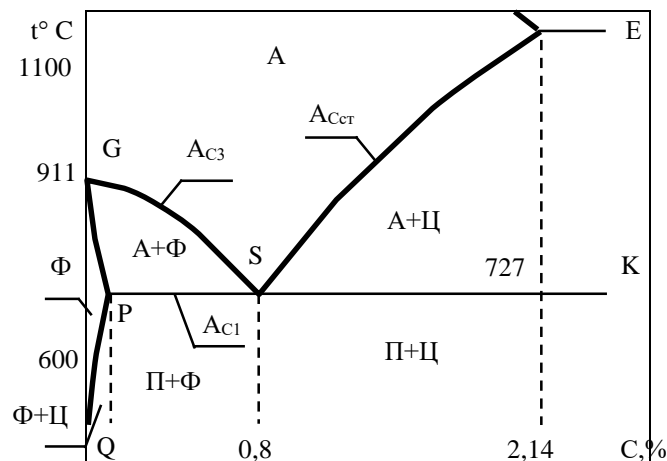


Рисунок 1 – Обозначение критических точек, применяемое при термической обработке

Любой режим термической обработки (рисунок 2) определяется следующими параметрами: температурой, до которой нагревают изделие (t_{max}); временем, затрачиваемым на нагрев до требуемой температуры (τ_n); выдержкой при заданной температуре (τ_b), необходимой для прогрева изделий по всему сечению; скоростью охлаждения (v) или временем охлаждения τ_o .

Для углеродистых сталей температуру нагрева под тот или иной вид термической обработки определяют исходя из диаграммы состояния Fe–Fe₃C; время – расчетным методом или по справочным данным. Полученные значения уточняются экспериментальным путем.

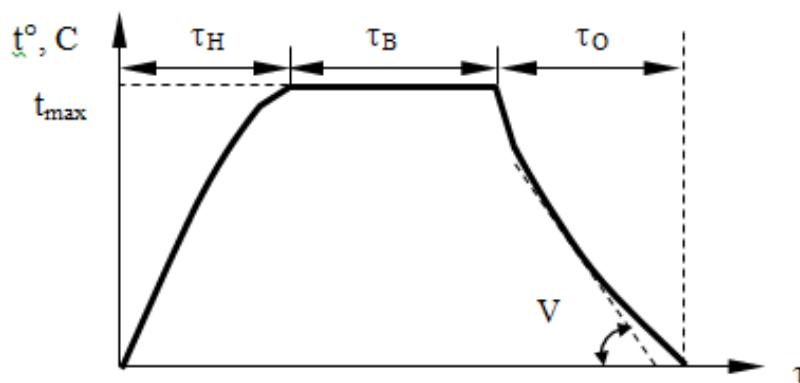


Рисунок 2 – Режим термической обработки

1.2 Отжиг

Отжиг – вид термической обработки, в результате которой сталь приобретает структуру, близкую к равновесной, т.е. отжиг вызывает разупрочнение, сопровождающееся повышением пластичности и снятием остаточных напряжений.

В общем случае отжигом принято называть нагрев металла до определенных температур, выдержку при этих температурах и медленное охлаждение вместе с печью. Температура нагрева при отжиге зависит от состава сплава и конкретной разновидности отжига; скорость охлаждения невелика: $20 \dots 200^\circ \text{C/ч}$. Все виды отжига проводят на металлургических заводах в специальных печах.

Различают два вида отжига:

- *I рода*, не связанный с фазовыми превращениями (исключая гомогенизацию);
- *II рода*, сопровождающийся фазовыми превращениями.

1.2.1 Отжиг I рода

Отжиг I рода проводят для рекристаллизации пластически деформированных полуфабрикатов; уменьшения внутрикристаллической ликвации в слитках или отливках; снижения остаточных напряжений в изделиях. Состояние

сплавов после этого вида термической обработки становится более равновесным.

Соответствующими видами отжига I рода являются (рисунок 3):

- рекристаллизационный;
- диффузионный (гомогенизация);
- для снятия внутренних напряжений.

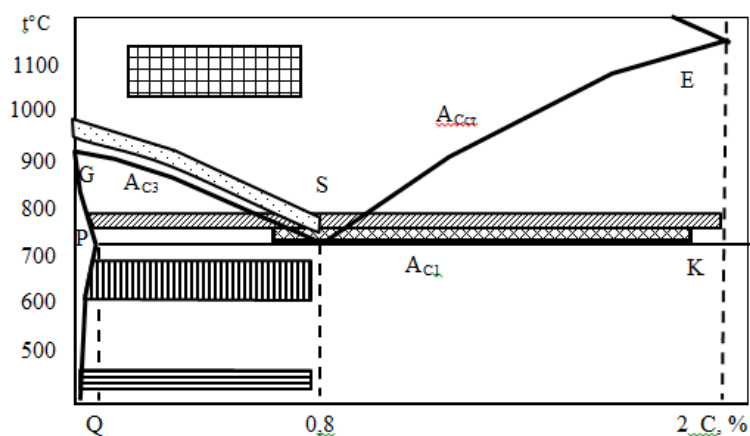


Рисунок 3 – Оптимальные интервалы нагрева стальных заготовок при различных видах отжига. ▨ – рекристаллизационный; ▩ – диффузионный; ▤ – для снятия внутренних напряжений; ▦ – полный; ▧ – неполный; ▨ – сфероидизация

Рекристаллизационный (смягчающий) отжиг применяют для устранения последствий холодной пластической деформации (снятия наклепа). Нагрев металла проводят до температур, превышающих температуры рекристаллизации (600...670° С) (рисунок 3). При такой термической обработке прочность стали уменьшается, а пластичность растет, что дает возможность проводить дальнейшую деформацию.

Диффузионный отжиг (гомогенизация) проводят при температуре 1100...1150° С (рисунок 3). В результате устраняется дендритная ликвация в литой стали; удаляется строчечная структура, образовавшаяся в доэвтектоидных сталях при обработке давлением; улучшается обрабатываемость резанием. Прочность горячекатаной стали несколько снижается, а у литой стали повышается

пластичность и вязкость.

Отжигом для снятия внутренних напряжений (термических, либо деформационных) называют термическую обработку, при которой достигается частичное или полное их устранение (релаксация). Температура нагрева при этом виде отжига невысока – 200...300° С (рисунок 3).

1.2.2 Отжиг II рода

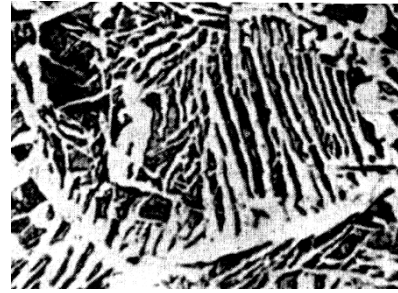
Отжиг II рода подразумевает нагрев стали до температур, превышающих температуры фазовых превращений (выше A_{C1} или A_{C3}), выдержку при этих температурах и медленное охлаждение вместе с печью. В процессе нагрева и охлаждения протекают фазовые превращения ($A \rightleftharpoons P$), определяющие структуру и свойства стали.

После отжига II рода стали получают структуры, в соответствии с диаграммой состояния Fe–Fe₃C, имеющие низкую твердость и прочность при высокой пластичности. При фазовой перекристаллизации измельчается зерно и устраняется видманштеттовая структура, строчечность, вызванная ликвацией, и сталь приобретает однородную мелкозернистую структуру (рисунок 4). Полностью снимаются остаточные напряжения.

Доэвтектоидные стали подвергают *полному отжигу* (перекристаллизационному), нагревая на 30...50° С выше критических точек A_{C3} ; а заэвтектоидные стали – *неполному отжигу*, нагревая на 30...50° С выше точек A_{C1} (рисунок 3). Охлаждение после отжига II рода проводят вместе с печью со скоростью 100...200° С/ч. Неполному отжигу также подвергают доэвтектоидные стали (0,2...0,4 % С) перед листовой штамповкой (высадка, выдавливание) с целью увеличения их пластичности.



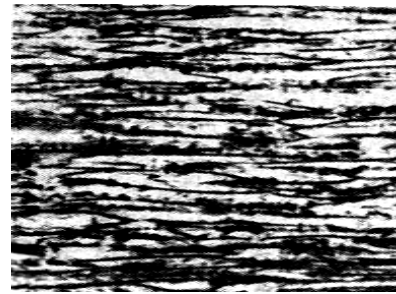
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – Микроструктура доэвтектоидной стали (0,45 % С):
а – в литом состоянии. х750; б – видманштеттова структура. х750;
в – строчечная после обработки давлением. х250;
г – в отожженном состоянии. х500

Инструментальные стали (0,7...2 % С) подвергают неполному отжигу *сфероидизации* (рисунок 3), производя нагрев на 10...30° С выше критических точек A_{C1} и медленно охлаждая со скоростью 20° С/ч или проводя изотермическую выдержку при температуре 650...680° С. В результате перлит приобретает округлую (зернистую) форму вместо пластинчатой (рисунок 5). Зернистый перлит имеет более низкую прочность и твердость, чем пластинчатый, что повышает обрабатываемость сталей резанием.



Рисунок 5 – Микроструктура эвтектоидной углеродистой стали после сфероидизирующего отжига. Зернистый перлит. x500

В большинстве случаев отжиг является подготовительной термической обработкой. Отжигу подвергают отливки, поковки, сортовой и фасонный прокат, трубы, горячекатаные листы. Понижая прочность и твердость отжиг облегчает обработку резанием средне- и высокоуглеродистой стали. Измельчая зерно, снимая внутренние напряжения и уменьшая структурную неоднородность, отжиг способствует повышению пластичности и вязкости по сравнению со свойствами, полученными после литья,ковки или прокатки. В некоторых случаях (крупные отливки) отжиг является окончательной термической обработкой.

1.3 Нормализация

При проведении нормализации преследуются те же цели, что и при отжиге II рода, т.е. перекристаллизация зерна стали; снятие внутренних напряжений; подготовка к дальнейшей пластической деформации, механической или термической обработке. Нормализация заэвтектоидных сталей применяется для устранения хрупкой цементитной сетки.

Нормализация отличается от отжига в основном условиями охлаждения; после нагрева доэвтектоидных сталей на $50...70^{\circ}\text{C}$ выше температуры A_{C3} , а заэвтектоидных – на $50...70^{\circ}\text{C}$ выше $A_{Cст}$ (рисунок 6) сталь охлаждают на спокойном воздухе. Скорость охлаждения при нормализации составляет $150...250^{\circ}\text{C/ч}$.

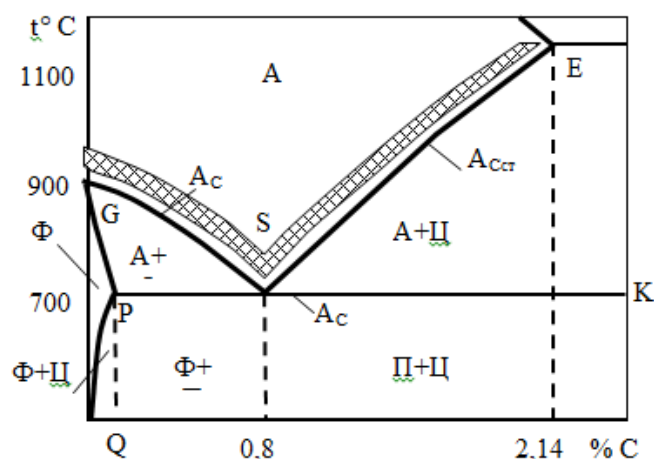


Рисунок 6 – Оптимальный интервал температур нагрева при нормализации углеродистых сталей

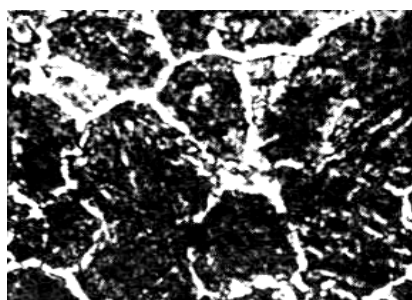


Рисунок 7 – Микроструктура стали (0,45 % C) после нормализации. x500

Ускоренное охлаждение повышает дисперсность перлита, а феррит, выделяющийся при охлаждении до критических температур $A_{r3} - A_{r1}$ (индекс r – температура при охлаждении), образует сплошные или разорванные оболочки вокруг зерен аустенита – ферритную сетку (рисунок 7).

Нормализации чаще всего подвергают конструкционные стали после горячей пластической деформации и фасонного литья.

Нормализация – более экономичная термическая операция, чем отжиг, так как меньше времени затрачивается на охлаждение стали. Кроме того, нормализация, обеспечивая полную перекристаллизацию структуры, улучшает прочностные свойства стали, уменьшает анизотропию свойств, вызванную наличием в горячекатаной стали строчечной структуры.

1.4 Закалка

Закалкой называется нагрев сталей выше температуры фазовых превращений, выдержке при этой температуре и последующем резком охлаждении, например в воде, масле.

Основное назначение закалки – получение стали с высокими твердостью, прочностью и износостойкостью. Качество закалки зависит от температуры нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения.

В данной лабораторной работе изучается влияние температуры нагрева на механические свойства стали при постоянных: скорости нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения.

1.4.1 Определение времени нагрева под закалку

Продолжительность нагрева зависит от таких факторов, как форма и размер детали, тип нагревательного устройства, вид нагревательной среды и расположение изделий на поду печи.

Для проведения любого теплового процесса термической обработки изделие нужно не только нагревать до заданной температуры, но и выдерживать при этой температуре до полных структурных превращений и полного прогрева детали по всему сечению. Причем скорость нагрева не должна быть слишком большой, чтобы не вызвать роста зерна и обезуглероживания поверхностных слоев.

Поэтому *общее время нагрева* под закалку складывается из *времени нагрева до заданной температуры* (τ_H) и *времени выдержки* при этой температуре (τ_B), необходимой для прогрева изделия по всему сечению:

$$\tau_{\text{ОБЩ}} = \tau_H + \tau_B. \quad (1)$$

Время нагрева до заданной температуры τ_H зависит от нагревающей способности среды, от размеров и формы детали, от способа их укладки в печи и определяется из выражения:

$$\tau_H = 0,1 \cdot D_1 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3, \quad (2)$$

где D_1 – размерная характеристика изделия (мм) – минимальный размер максимального сечения (т.е. для детали находят максимальное поперечное сечение, а в нем минимальный размер);

K_1 – коэффициент среды (для газа 2; для соли 1);

K_2 – коэффициент формы (для шара 1; цилиндра 2; параллелепипеда – 2,5; пластины – 4);

K_3 – коэффициент равномерности нагрева (всесторонний нагрев – 1; односторонний – 4).

Составляющая τ_B не зависит от формы и размера изделия и определяется скоростью фазовых превращений и дисперсностью исходной структуры. Значение τ_B должно быть минимальным (35...75 с на 1 мм сечения), но обеспечивать завершение фазовых превращений в стали и необходимую концентрацию углерода в аустените.

Иногда применяют приблизительный подсчет общего времени нагрева. Так, при нагреве в электрических воздушных печах время нагрева τ_H принимают равным 0,8...1 мин на 1 мм сечения, а время выдержки – 1/5 от времени нагрева ($\tau_B = \tau_H/5$).

При нагреве крупных деталей (когда время нагрева значительно больше чем 1...2 мин) величиной τ_B можно пренебречь; в случае нагрева мелких деталей (диаметром или толщиной менее 1 мм) пренебрегают составляющей τ_H . Точно установить время нагрева можно лишь опытным путем для данной детали в данных конкретных условиях.

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1 Измерить твердость образцов в отожженном и нормализованном состоянии на твердомере Роквелла (шкала В), результаты занести в протокол испытаний (приложение А, таблица 1).

2.2 Определить общее время нагрева по формулам (1) и (2), определив предварительно D_1 .

2.3 Нагреть образцы в муфельной печи до температур 500, 600, 700, 800 и 900° С, с учетом общего времени нагрева.

2.4 Произвести охлаждение нагретых образцов в воде.

2.5 Зачистить торцы образцов от окалины наждачной бумагой.

2.7 Измерить твердость термообработанных образцов на приборе Роквелла (шкала С). Сделать перевод твердости HRC в твердость по Бринеллю HB. Полученные результаты занести в протокол испытаний (приложение А, таблица 1).

2.8 Построить график зависимости твердости от температуры нагрева HB = f(t) (приложение А, рисунок 1).

2.9 По результатам исследований сделать краткое заключение о влиянии температуры нагрева на твердость углеродистой стали.

3 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

3.1 Краткие теоретические сведения об отжиге, нормализации и закалке сталей (назначение, режим, область применения).

3.2 Расчет общего времени нагрева образцов.

3.3 Протокол испытаний (приложение А).

3.4 Выводы по проделанной работе.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Термическая обработка. Общее положение, цели и задачи.

2 Обозначение критических точек при термической обработке.

- 3 Параметры, определяющие режим термической обработки.
- 4 Что такое отжиг?
- 5 Отжиг I рода. Разновидности, режимы, назначение.
- 6 Отжиг II рода. Разновидности, режимы, назначение.
- 7 В чем заключается отличие между отжигом I и отжигом II рода?
- 8 Особенности отжига на зернистый перлит (сфероидизация).
- 9 В каких случаях применяют рекристаллизационный и гомогенизирующий отжиг?
- 10 Нормализация. Назначение, режим.
- 11 Основная цель закалки.
- 12 От каких факторов зависит время нагрева под закалку?
- 13 Как определить время нагрева при закалке?
- 14 Влияние температуры нагрева на механические свойства стали.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица 1 – Протокол испытаний

№ образца	Твердость в исходном состоянии		Температура нагрева, °C	Время нагрева $\tau_{\text{общ}}$, мин	Твердость после термообработки	
	HRB	HВ			HRC	HВ



Рисунок 1 – Зависимость твердости углеродистых сталей от температуры нагрева

Лабораторная работа №2

Влияние скорости охлаждения при закалке на микроструктуру и свойства углеродистых сталей

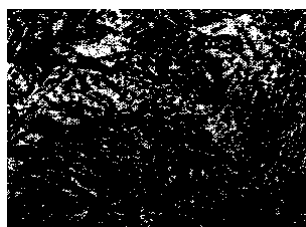
Цель работы: изучить влияние скорости охлаждения на микроструктуру и свойства углеродистых сталей.

Применяемое оборудование, материалы, инструмент: муфельная печь; закалочный бачок; щипцы; твердомер Роквелла; металлографический микроскоп; образцы отожженных углеродистых сталей; бачки с закалочными средами; наждачная бумага.

1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Изменение механических свойств при закалке достигается получением метастабильной (неравновесной) структуры – мартенсита.

Мартенситом называют пересыщенный твердый раствор углерода в феррите. Содержание углерода в нем такое же, как и в исходном аустените. Структура мартенсита низко- и среднеуглеродистых сталей имеет форму реек – реечный мартенсит (рисунок 1. а) ориентированных в одном направлении. В высокоуглеродистых сталях кристаллы мартенсита представляют собой пластины, которые в плоскости шлифа имеют вид игл – игольчатый мартенсит (рисунок 1. б).



а)



б)

Рисунок 1 – Микроструктура мартенсита стали. x500:

а – реечная; б – игольчатая

Мартенсит обладает высокой твердостью (HRC 60 при $C = 0,4 \%$), однако с увеличением содержания углерода возрастает хрупкость стали. Кроме изменения механических свойств, в результате превращения $A \rightarrow M$ изменяются физические свойства стали, заметно увеличивается объем.

Для получения мартенситной структуры сталь следует охлаждать с большой скоростью. Минимальную скорость охлаждения, при которой происходит мартенситное превращение, называют *критической скоростью закалки*. При охлаждении аустенита с такой скоростью он не успевает превратиться в феррито–цементитную смесь и образует неравновесную структуру – мартенсит.

Принципиальное отличие превращения $A \rightarrow M$ при закалке от аустенита в

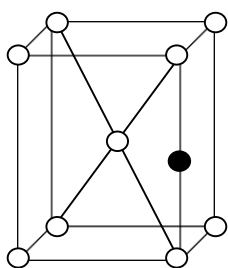


Рисунок 2 – Тетрагональная решетка мартенсита. \circ – атом железа; \bullet – атом углерода

перлит при медленном охлаждении заключается в том, что оно происходит бездиффузионно. При мартенситном превращении наблюдается лишь перестройка ГЦК решетки аустенита в ОЦК решетку феррита без выделения из твердого раствора углерода, приводящая к искажению кубической решетки до тетрагональной (рисунок 2). Причем, чем больше углерода было в исходном аустените, тем большую степень тетрагональности имеет решетка и тем тверже закаленная сталь.

Мартенситное превращение начинается при температурах, называемых мартенситной точкой M_H , и протекает в широком интервале температур (от $380^\circ C$ при $0,2 \%$ C , до $120^\circ C$ при $1,6 \%$ C). Средняя скорость роста кристаллов мартенсита составляет около 1 км/с .

Температуру при которой заканчивается превращение $A \rightarrow M$, обозначают M_K . Однако в сталях с высоким и средним содержанием углерода мартенситное превращение не заканчивается при охлаждении до комнатной температуры, и часть аустенита остается не распавшимся (так называемый *остаточный аустенит*).

1.1 Выбор температурного интервала нагрева под закалку

Получение мартенситной структуры во многом зависит от правильного выбора температуры нагрева под закалку. В зависимости от температуры нагрева различают:

– *полную закалку* – нагрев стали выше критических точек A_{C3} на $30...50^\circ\text{C}$ (рисунок 3). Такая температура обеспечивает при нагреве получение структуры мелкозернистого аустенита и, соответственно, при охлаждении со скоростью больше критической, – мелкокристаллического мартенсита. Недогрев до интервала закалочных температур приводит к сохранению в структуре закаленной стали феррита, а перегрев выше A_{C3} на $70...100^\circ\text{C}$ – к росту зерна аустенита. Полной закалке подвергают доэвтектоидные стали.

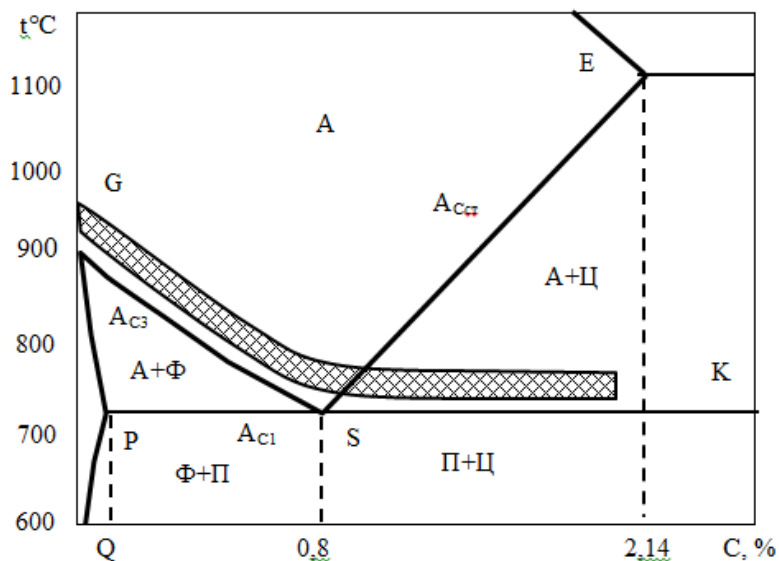


Рисунок 3 – Оптимальный температурный интервал нагрева под закалку углеродистых сталей

– *неполную закалку* – нагрев выше критических точек A_{C1} на $30...50^\circ\text{C}$ (рисунок 3). Неполной закалке, как правило, подвергают эвтектоидные и заэвтектоидные стали. После закалки эвтектоидная сталь имеет структуру мартенсита, а

заэвтектоидная мартенсита и цементита. Кроме того, в структуре этих сталей будет присутствовать остаточный аустенит.

1.2 Скорость охлаждения

Для получения мартенситной структуры необходимо переохладить аустенит до температуры M_H , т. е. предотвратить превращение $A \rightarrow \Phi$. Последнее достигается резким охлаждением со скоростью от 1400 до $400^\circ \text{C}/\text{с}$. Как правило, такой скорости охлаждения добиваются погружением закаливаемой детали в холодную воду ($t = 20^\circ \text{C}$) или в воду с добавками соли (NaCl) или едкого натра (NaOH).

При изучении влияния скорости охлаждения на формирование структуры закаленной стали удобно воспользоваться диаграммой изотермического распада аустенита: «С–диаграммой» с наложенными на нее линиями, соответствующими различным скоростям охлаждения (рисунок 4).

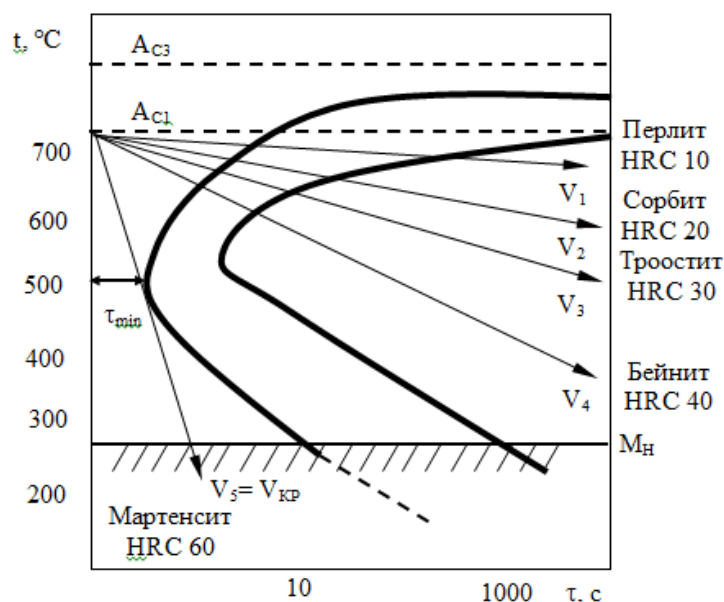


Рисунок 4 – Диаграмма изотермического распада аустенита для доэвтектоидной стали с наложенными на нее кривыми охлаждения $V_1 > V_2 > V_3 > V_4 > V_5$

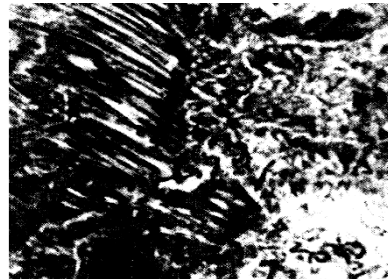
При медленном охлаждении вместе с печью со скоростью V_1 (рисунок 4), образуется крупнопластинчатая *ферритно–цементитная смесь*, твердостью HRC 10.

При охлаждении на воздухе, со скоростью V_2 (рисунок 4), образуется тонкодисперсная смесь феррита и цементита – *сорбит закалки* (рисунок 5. а), имеющий твердость HRC 20.

Более мелкодисперсная перлитная смесь, называемая *трооститом закалки* (рисунок 5. б), обладающая твердостью HRC 30, формируется при охлаждении углеродистой стали в масле со скоростью V_3 (рисунок 4).



а)



б)

Рисунок 5 – Микроструктура закаленной стали: а – сорбит закалки (0,5 % С). $\times 1100$; б – троостит закалки (0,7 % С). $\times 1000$

При охлаждении со скоростью V_4 происходит промежуточное превращение аустенита с образованием бейнита, состоящего из науглероженного феррита и частиц цементита, имеющего в зависимости от температурного интервала образования перистое или игольчатое строение.

Увеличение скорости охлаждения (от V_4 и выше) задерживает протекание диффузионных процессов, аустенит переохлаждается до температуры M_n , и затем происходит бездиффузионное превращение $A \rightarrow M$.

При скорости охлаждения V_5 (рисунок 4) структура стали полностью состоит из мартенсита с твердостью HRC 60 (рисунок 1).

Таким образом, *критической скоростью закалки* $V_{кр}$ (минимальная скорость охлаждения) будет скорость, большая или равная скорости охлаждения V_5 ,

обеспечивающая мартенситное превращение и получение структуры мартенсита с твердостью HRC 60.

Критическая скорость закалки неодинакова для разных сталей и зависит от устойчивости аустенита. Чем больше его устойчивость τ_{\min} (рисунок 4), а, следовательно, чем правее от оси температур расположена «С–диаграмма», тем меньше критическая скорость закалки.

Экспериментально построенные диаграммы изотермического распада аустенита (термокинетические диаграммы) позволяют определить $V_{\text{кр}}$ для всех марок сталей.

1.3 Закалочные среды

При закалке для переохлаждения аустенита до температур мартенситного превращения требуется быстрое охлаждение, но не во всем интервале температур (от температуры нагрева до комнатной), а только в пределах $650 \dots 400^\circ \text{C}$, то есть в том интервале температур, в котором аустенит менее всего устойчив и быстрее всего превращается в перлит. В области мартенситного превращения ($300 \dots 200^\circ \text{C}$), наоборот, желательно замедлить охлаждение. В противном случае, к структурным напряжениям могут прибавиться значительные термические, что может привести к короблению и возникновению трещин. Таким образом, наилучшей закалочной средой считается та, которая быстро охлаждает сталь в интервале температур $650 \dots 400^\circ \text{C}$ и медленно – ниже $300 \dots 200^\circ \text{C}$.

Для охлаждения стальных деталей при закалке обычно применяют различные закалочные среды: воду, водные растворы солей, расплавленные соли, минеральные масла. Закалочные среды резко отличаются друг от друга своими физическими свойствами, то есть они с разной интенсивностью отнимают тепло от нагретых под закалку деталей. Однако единой, универсальной закалочной среды пока нет, поэтому на практике пользуются различными средами (таблица 1).

Таблица 1 – Скорость охлаждения стали в зависимости от закалочных сред

Закалочная среда	Скорость охлаждения (°C/с) в интервале температур (°C)	
	600...400	300...200
Вода:		
– при 20° C (циркулирующая);	600	270
– при 20° C (спокойная);	350	700
– при 40° C	100	270
– при 80° C	30	200
Вода дистиллированная при 20° C	250	200
10 % раствор в воде при 20° C:		
– поваренной соли (NaCl)	1100	300
– едкого натра (NaOH)	1200	300
– соды (Na ₂ CO ₃)	800	270
Минеральное масло при 20° C	120	25

Механизм действия закалочных сред следующий. В момент погружения изделия в закалочную среду вокруг него образуется пленка перегретого пара, охлаждение происходит через слой этой «паровой рубашки», то есть относительно медленно. Эта стадия носит название *пленочного кипения*. Когда температура поверхности достигнет значения, определяемого составом закалывающей жидкости, происходит разрыв «паровой рубашки» и жидкость начинает кипеть на поверхности детали, ускоряя ее охлаждение – *пузырчатое кипение*.

Закалочная среда охлаждает тем интенсивней, чем шире интервал пузырчатого кипения, поэтому рекомендуется производить закалку в циркулирующей среде, непрерывно перемещая детали в вертикальном или горизонтальном направлениях.

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1 Измерить твердость образцов в исходном состоянии на твердомере Роквелла (шкала В) и занести полученные данные в протокол испытаний (приложение А, таблица 1).

2.2 По диаграмме состояния Fe–Fe₃C определить оптимальную температуру нагрева (для данной марки стали).

2.3 Определить общее время нагрева образца $\tau_{\text{общ}}$ (предыдущая лабораторная работа).

2.4 Нагреть образцы в муфельной печи.

2.5 После окончания нагрева охладить образцы в различных средах: вместе с печью; на воздухе; в масле; в воде.

2.6 Зачистить торцы образцов от окалин наждачной бумагой.

2.7 Измерить твердость закаленных образцов на приборе Роквелла (шкала С) и перевести их в НВ. Полученные результаты занести в таблицу (приложение А, таблица 1).

2.8 Изучить микроструктуру сталей, охлажденных с различной скоростью, с помощью металлографического микроскопа. Зарисовать их.

2.9 По результатам исследований построить графическую зависимость влияния закалочных сред на твердость стали (приложение А, рисунок 1).

3 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

3.1 Обоснование выбора температуры нагрева под закалку, скорости охлаждения и закалочной среды.

3.2 Протокол испытаний.

3.3 Рисунки микроструктур закаленных сталей.

3.4 Выводы по проделанной работе.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Основная цель закалки.
- 2 Мартенсит. Свойства, строение.
- 3 Особенности протекания мартенситного превращения.
- 4 Условия получения мартенситной структуры сталей.
- 5 Полная закалка. Выбор температур, получаемая структура и свойства. Область применения.
- 6 Неполная закалка. Выбор температур, получаемая структура и свойства. Область применения.
- 7 Что такое критическая скорость закалки?
- 8 Охлаждающие среды, применяемые при закалке.
- 9 Как определить время нагрева при закалке?
- 10 Влияние скорости охлаждения на структуру и свойства стали.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица 1 – Протокол испытаний

№ образца	Твердость в исходном состоянии HRB	Температура нагрева, °C	Время нагрева $\tau_{общ}$, мин	Охлаждающая среда	Твердость после закалки	
					HRC	HV

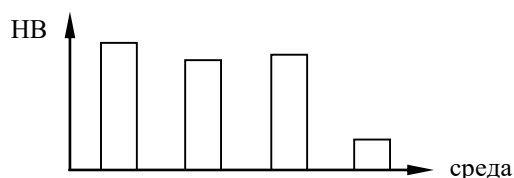


Рисунок 1 – Зависимость твердости углеродистых сталей от охлаждающей среды. Графический пример

Лабораторная работа №3

Изменение механических свойств закаленных сталей при отпуске

Цель работы: изучить влияние температур отпуска на механические свойства углеродистой стали.

Применяемое оборудование, материалы, инструмент: муфельная печь; твердомер Роквелла; закаленные образцы стали (цилиндрические или прямоугольные, толщиной 10...15 мм из стали 40...65 или инструментальной стали У9...У12); клещи; штангенциркуль; наждачная бумага.

1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Отпуском называют операцию термической обработки, заключающуюся в нагреве закаленных сталей до температуры ниже критических точек A_{C1} , выдержке при заданной температуре и последующем охлаждении с определенной скоростью, как правило, на воздухе.

Отпуск является окончательной операцией термической обработки, в результате которой сталь получает требуемые механические свойства. В зависимости от температуры отпуска понижаются характеристики прочности (пределы прочности σ_B и текучести $\sigma_{0,2}$) и твердость (НВ) закаленной стали, но увеличивается ее пластичность (относительное удлинение δ и относительное сужение ψ) (рисунок 1).

Кроме того, отпуск полностью или частично устраняет внутренние напряжения, возникающие при закалке. При отпуске снижается электрическое сопротивление, изменяются магнитные свойства, вырастает сопротивление коррозии. Указанные изменения механических и физико-механических свойств являются следствием изменения внутреннего строения закаленной стали. При отпуске закаленных сталей сильно напряженный мартенсит закалки, имеющий тетраго-

нальную кристаллическую решетку, постепенно распадается на ферритно-цементитную смесь, и структура из неустойчивого состояния переходит в более равновесное, в результате чего уменьшаются внутренние напряжения, понижается твердость, повышается пластичность и ударная вязкость. Чем выше температура отпуска, тем полнее идет процесс распада мартенсита.

Дилатометрическими измерениями установлено, что в сталях, не содержащих легирующих элементов, первое превращение происходит при температуре нагрева $80...200^{\circ}\text{C}$, второе – при $200...260^{\circ}\text{C}$, третье – при $260...380^{\circ}\text{C}$.

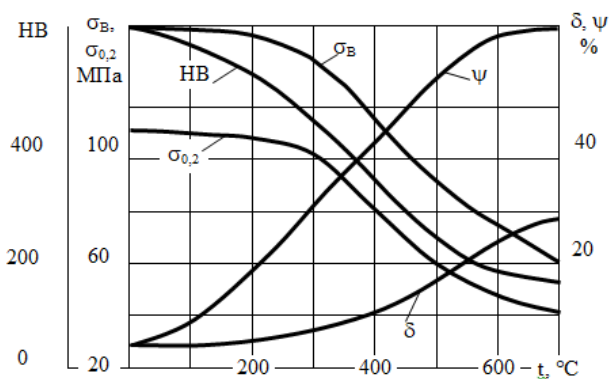


Рисунок 1 – Зависимость механических свойств закаленной стали от температуры отпуска

При первом превращении ($80...200^{\circ}\text{C}$) уменьшается степень тетрагональности кристаллической решетки мартенсита вследствие выделения из нее углерода в виде ϵ -карбида (Fe_2C), причем кристаллическая решетка мартенсита сопряжена (когерентна) с кристаллической решеткой ϵ -карбида, а концентрация углерода в различных участках мартенсита неодинакова. Образующийся в результате первого превращения *мартенсит отпуска* состоит из пересыщенного α -твердого раствора и карбидных частиц Fe_2C (рисунок 2. а).

При температурах *второго превращения* ($200...260^{\circ}\text{C}$) диффузионные

процессы усиливаются и одновременно протекают несколько процессов: продолжается распад мартенсита, начинает распадаться остаточный аустенит и начинается карбидное превращение (ϵ -карбид укрупняется и превращается в цементит Fe_3C). В результате образуется смесь кристаллов низкоуглеродистого (0,2 %) мартенсита и дисперсного цементита. Когерентность решеток нарушается, что вызывает снижение внутренних напряжений. Структура стали – мартенсит отпуска.

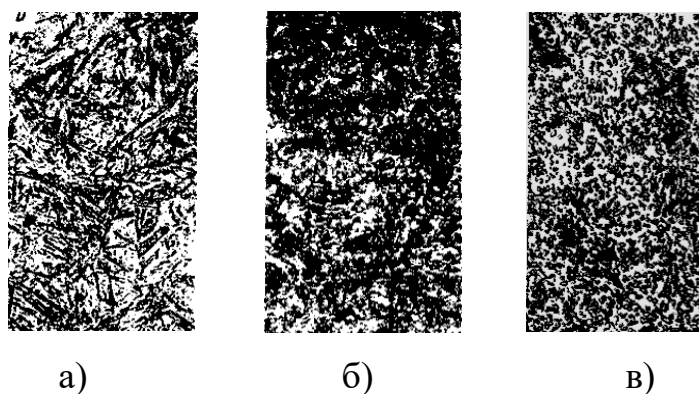


Рисунок 2 – Микроструктура отпущенной стали (0,6 % C):

а – мартенсит отпуска; б – троостит отпуска; в – сорбит отпуска. $\times 500$

При *третьем превращении* ($260\dots 380^\circ C$) завершается распад мартенсита и карбидное превращение. Из мартенсита выделяется весь пересыщенный углерод в виде цементита, исчезает тетрагональность решетки, и мартенсит переходит в феррит с содержанием углерода менее 0,023 %, что соответствует его равновесной растворимости. Частицы цементита продолжают расти и становятся полностью некогерентными. Образовавшаяся в конце третьего превращения дисперсная ферритно-цементитная смесь (частицы цементита имеют форму тонких пластин размером $0,3 \cdot 10^{-5}$ мм) носит название *троостит отпуска* (рисунок 2. б).

При более высоких температурах нагрева (до $650^\circ C$) в углеродистых сталях также происходит изменения структуры, не связанные с фазовыми превращениями: изменяются форма и размер карбидов; структура феррита. Скорость этих процессов увеличивается с повышением температуры.

Начиная с температур $350\dots 400^\circ C$ происходит *коагуляция* (укрупнение)

и *сфероидизация* кристаллов цементита. Размер карбидов достигает $1 \cdot 10^{-5}$ мм. При нагреве выше 400°C начинаются изменения в зернах феррита и по своей форме они приближаются к равноосной. Структура, образующаяся при нагреве выше $450 \dots 650^{\circ}\text{C}$, называется *сорбитом отпуска* (рисунок 2. в).

Нагрев выше 650°C и вплоть до A_{C1} приближает структуру к равновесной: образуется перлит и обособляется избыточный феррит (в доэвтектоидной стали). Дисперсность феррита уменьшается, и структура стали похожа на строение зернистого перлита отожженной стали.

В зависимости от требуемых свойств стали и температуры нагрева виды отпуска подразделяют на:

- *низкотемпературный* (низкий);
- *среднетемпературный* (средний);
- *высокотемпературный* (высокий);

Низкотемпературный отпуск производится при температуре $150 \dots 250^{\circ}\text{C}$. При этом снижаются закалочные макронапряжения, мартенсит закалки переводится в отпущенный мартенсит, повышается пластичность без заметного снижения твердости (рисунок 1). Закаленная сталь ($0,6 \dots 1,3\%$ С) после низкого отпуска сохраняет твердость $58 \dots 63\text{ HRC}$, а, следовательно, высокую износостойкость.

Низкотемпературный отпуск применяют для режущего и мерительного инструмента, изготовленного из углеродистых сталей; цементированных, цианированных и поверхностнозакаленных деталей (зубчатых колес).

Среднетемпературный отпуск производят при температуре $350 \dots 400^{\circ}\text{C}$. В этом интервале температур мартенсит превращается в троостит, имеющий твердость около $40 \dots 50\text{ HRC}$. Такой отпуск обеспечивает высокие пределы упругости, выносливости и релаксационную стойкость при относительно высокой твердости. Применяют для пружин и рессор и ударного инструмента.

Высокотемпературный отпуск проводят при $500 \dots 650^{\circ}\text{C}$. В результате такого отпуска создаются наилучшие соотношения механических характеристик

стали: прочности, твердости и пластичности (рисунок 1). При высоком отпуске происходит полное снятие внутренних напряжений.

Комплексную термическую обработку, сочетающую в себе закалку с высокотемпературным отпуском на структуру сорбита, называют *улучшением*. В улучшенном состоянии достигается высокая ударная вязкость ($KCU = 1,3$ МДж/м²), пластичность ($\delta = 60$ %) и, как следствие, малая чувствительность к концентраторам напряжений. Улучшение является основным видом термической обработки среднеуглеродистых сталей (шатуны, маховики, оси).

1.1 Определение времени выдержки и скорости охлаждения при различных видах отпуска

Время выдержки (τ_B) при отпуске зависит от температуры отпуска и габаритных размеров деталей. Оно должно быть достаточным для окончания процессов диффузии в закаленной стали, так как в противном случае эффективность отпуска уменьшается. Время выдержки при отпуске несколько больше, чем при закалке, причем при низких температурах выдержка больше, чем при высоких.

В практике термической обработки применяют приблизительный подсчет времени выдержки, исходя из следующих соображений.

– *Низкотемпературный отпуск (200° С):*

$$\tau_B = 30 \text{ мин} + (1 \text{ мин на } 1 \text{ мм диаметра или толщины образца}) \quad (1).$$

– *Среднетемпературный отпуск (400° С):*

$$\tau_B = 20 \text{ мин} + (1 \text{ мин на } 1 \text{ мм диаметра или толщины образца}) \quad (2).$$

– *Высокотемпературный отпуск (600° С):*

$$\tau_B = 10 \text{ мин} + (1 \text{ мин на } 1 \text{ мм диаметра или толщины образца}) \quad (3).$$

Охлаждение углеродистых сталей после отпуска можно проводить с любой скоростью, так как температура нагрева ниже критических точек A_{C1} . Однако слишком быстрое охлаждение может вызвать образование термических напряжений, особенно в деталях сложной формы, и привести к их короблению. Поэтому обычно стали охлаждают на воздухе.

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1 На боковой поверхности каждого образца проставить клеймо марки стали. Марки сталей занести в протокол испытаний (приложение А, таблица 1).

2.2 Измерить штангенциркулем диаметры (диагонали) образцов. Результаты измерения записать в протокол испытаний.

2.3 Определить твердость (HRC) образцов в исходном (закаленном) состоянии и перевести их в HB. Полученные результаты записать в протокол испытаний (приложение А, таблица 1).

2.4 Определить время выдержки при температурах отпуска: 200, 400, 600° С (формулы 1; 2; 3).

2.5 Образцы поместить в муфельную печь, нагретую до соответствующих температур отпуска (200, 400, 600° С), произвести отпуск, соблюдая рассчитанное время выдержки для различных видов отпуска, и охладить на воздухе.

2.6 Торцы образцов зачистить шлифовальной бумагой.

2.7 Определить твердость (HRC). Полученный результат записать в протокол испытаний (приложение А, таблица 1).

2.8 Построить график изменения твердости в зависимости от температуры отпуска $HRC = f(t)$ (приложение А, рисунок 1).

3 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

3.1 Краткие теоретические сведения о отпуске закаленных сталей: превращения при отпуске; виды отпуска; характеристика механических свойств.

3.2 Расчет времени выдержки для различных видов отпуска.

3.3 Протокол испытаний (приложение А).

3.4 График изменения твердости в зависимости от температуры отпуска $HRC = f(t)$.

3.5 Выводы по проделанной работе.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Что такое отпуск?
- 2 Разновидности отпуска.
- 3 Какие превращения происходят в структуре закаленной стали при ее нагреве до критических точек A_{C1} ?
- 4 Структурные составляющие, образующиеся в закаленных сталях при различных видах отпуска.
- 5 Как изменяются механические свойства закаленных углеродистых сталей в зависимости от вида отпуска?
- 6 Температурный интервал нагрева образца при а) низкотемпературном; б) среднетемпературном; в) высокотемпературном отпуске.
- 7 Область применения низкотемпературного отпуска.
- 8 Область применения среднетемпературного отпуска.
- 9 Область применения высокотемпературного отпуска.
- 10 Как определяется время выдержки при различных видах отпуска.
- 11 Что такое улучшение, когда оно применяется?

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица 1 – Протокол испытаний

№ образца	Марка стали	Диаметр или толщина образца, мм	Твердость в закаленном состоянии		Время выдержки при отпуске τ_B , мин.	Твердость HRC после отпуска при температуре		
						200° C	400° C	600° C
			HRC	HB				

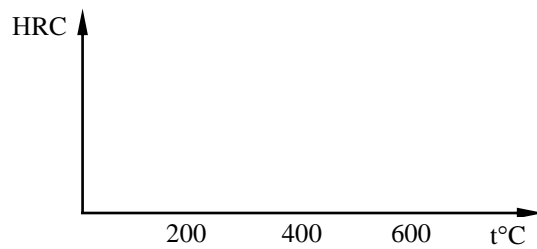


Рисунок 1 – Зависимость твердости углеродистых сталей от температуры отпуска

Лабораторная работа №4

Определение прокаливаемости стали методом торцевой закалки

Цель работы: освоить методику определения прокаливаемости стали и определить прокаливаемость углеродистой стали.

Применяемое оборудование, материалы, инструмент: муфельная печь; твердомер Роквелла; образцы для торцевой закалки (различных марок); стальной цилиндрический стакан с графитовой подставкой и крышкой; установка для торцевой закалки; наждачная бумага.

1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Под *прокаливаемостью* стали понимают способность стали закаливаться на определенную глубину сечения образца (детали).

Величина прокаливаемости является одним из главных критериев обоснованного выбора марки стали для изготовления деталей машин и инструментов. В зависимости от условий работы этих изделий сталь должна обладать соответствующей прокаливаемостью. Если изделия должны отличаться высокими свойствами по всему сечению, когда действующие напряжения распределены по сечению однородно и отличаются высоким уровнем значений, необходимо выбирать стали с высокой прокаливаемостью, чтобы по всему сечению при закалке образовывалась мартенситная структура, а после отпуска – структура сорбита. Для изделий, работающих в условиях изгиба или кручения, когда максимальные напряжения, возникающие в условиях их службы, действуют в поверхностном слое, целесообразно применять стали с небольшой прокаливаемостью, у которых после закалки структура мартенсита находится в основном в пределах слоя, воспринимающего основную нагрузку.

Прокаливаемость определяется составом стали, природной величиной зерна, условиями нагрева и охлаждения.

Основным фактором, определяющим прокаливаемость стали, является критическая скорость охлаждения V_K , зависящая от состава стали. При закалке стального цилиндрического образца скорость охлаждения распределится по сечению следующим образом: она будет наибольшей у поверхности и наименьшей в середине образца (рисунок 1. а).

Если действительная скорость охлаждения в сердцевине превысит критическую ($V'''_K > V_K$), то сталь получит мартенситную структуру (М) по всему сечению и будет иметь сквозную прокаливаемость (рисунок 1. г). Если действительная скорость охлаждения в сердцевине будет меньше V_K ($V''_K < V'_K < V_K$), то образец прокалится только на некоторую глубину h' или h'' и прокаливаемость будет неполной (рисунок 1. б, в). В этом случае в сердцевине произойдет распад аустенита с образованием структуры феррита (Ф) и карбидов (К): троостита, сорбита или перлита. Следовательно, *прокаливаемость увеличивается по мере понижения критической скорости закалки.*

Так как в сталях при содержании углерода от 0,3 до 0,8 % критическая скорость закалки уменьшается от 1000 до 180 °С/с, то V_K будет зависеть от содержания углерода в стали: *прокаливаемость будет увеличиваться с повышением содержания углерода в стали.*

Существенное влияние на прокаливаемость оказывает величина аустенитных зерен. *Измельчение зерен аустенита приводит к повышению V_K и уменьшению прокаливаемости.* Однако укрупнение зерен ведет к ухудшению механических свойств, поэтому использование укрупнения зерна для увеличения прокаливаемости не рекомендуется.

Прокаливаемость стали также повышается с увеличением температуры нагрева под закалку и длительности нагрева (в этом случае наблюдается рост аустенитного зерна).

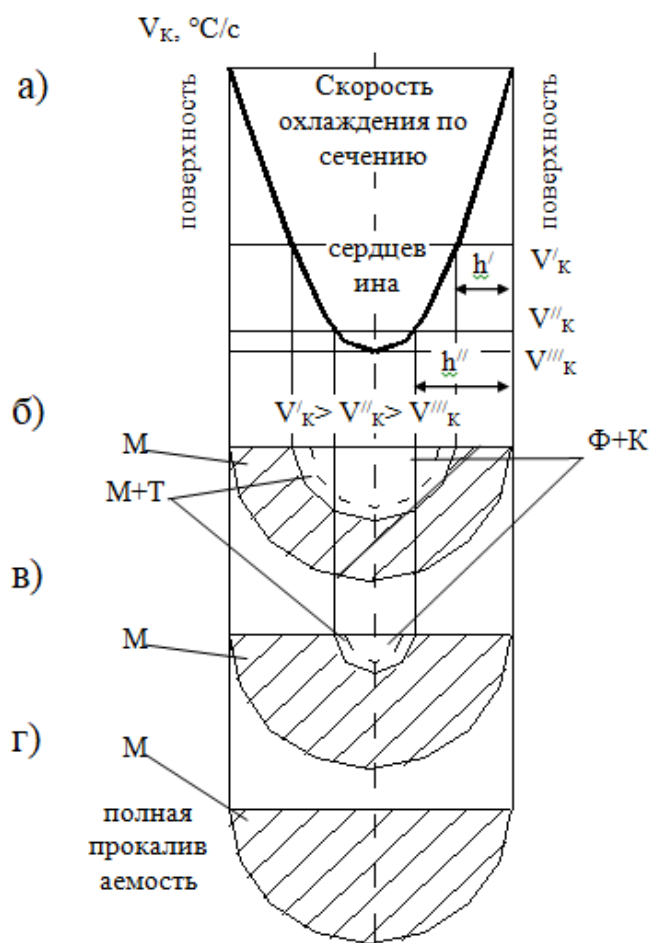


Рисунок 1 – Зависимость прокаливаемости от величины критической скорости закалки (заштрихованная область – прокаленный слой)

Критерием прокаливаемости считают расстояние от поверхности до полумартенситной зоны – 50 % мартенсита + 50 % троостита (D_{50}), так как ее легко определить по твердости и путем микроанализа. Твердость полумартенситного слоя определяется содержанием углерода в стали (таблица 1) и может быть заранее известна.

Таблица 1 – Зависимость твердости полумартенситной зоны от содержания углерода

Содержание углерода, %	Твердость полумартенситной зоны, HRC
0,23.....0,27	30
0,28.....0,32	35
0,33.....0,42	40
0,43.....0,52	45
0,53.....0,62	50

Полумартенситная структура не всегда обеспечивает требуемые механические свойства, поэтому иногда прокаливаемость определяют по толщине слоя, состоящего из 95 % (D_{95}) или 99 % (D_{99}) мартенсита. Следует отметить, что величины прокаливаемости D_{50} ; D_{95} и D_{99} связаны между собой следующим образом: $D_{95} = 0,67 D_{50}$; $D_{99} = 0,47 D_{50}$.

Диаметр образца, в котором полумартенситная зона образуется в центре, называют *критическим* (реальным) *диаметром* D_K . Детали, имеющие критический диаметр, прокаливаются насквозь. Очевидно, что сквозная прокаливаемость будет наблюдаться и для деталей, имеющих $D < D_K$. Практическое значение критического диаметра состоит в том, что, зная D_K , возможно определить наибольшее сечение детали, изготовленной из данной стали, которая может быть закалена насквозь. Критический диаметр определяется, помимо всего, характером охлаждающей среды: с увеличением скорости охлаждения D_K увеличивается.

Прокаливаемость одной и той же стали может колебаться в значительных пределах в зависимости от изменения химического состава, величины зерна, размера и формы изделия, поэтому ее характеризуют не кривой, а полосой прокаливаемости.

Для экспериментального определения прокаливаемости наименее трудоемким является *метод торцовой закалки* (ГОСТ 5657-69).

1.1 Метод торцевой закалки

Цилиндрический образец, диаметром 25 мм и длиной 100 мм, нагретый до температур закалки, охлаждают струей воды только с торца на специальной установке (рисунок 2).

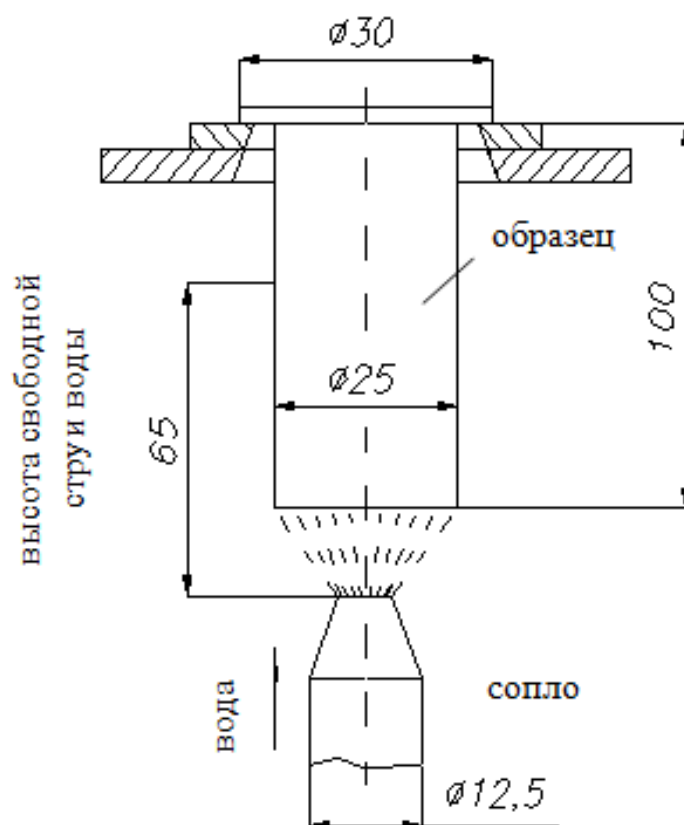


Рисунок 2 – Схема установки для определения прокаливаемости

После охлаждения образца измеряют твердость по образующей цилиндра и строят график изменения твердости по длине образца (рисунок 3).

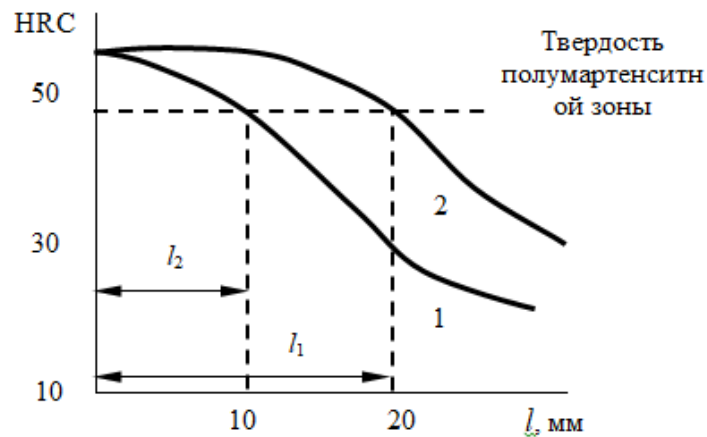


Рисунок 3 – Распределение твердости по длине образца после торцевой закалки для сталей с различной прокаливаемостью

1 – сталь с низкой прокаливаемостью; 2 – с высокой прокаливаемостью

Оригинальным в этом способе является то, что каждая точка поверхности стандартного образца охлаждается с различной и вполне определенной скоростью. Сопоставление двух кривых (рисунок 3) наглядно показывает, что сталь, характеризуемая кривой 2, имеет более высокую прокаливаемость, чем сталь, у которой твердость изменяется в соответствии с кривой 1.

Расстояние от торца до зоны с полумартенситной твердостью, называемое характеристическим расстоянием, и определяет прокаливаемость стали (l_1 и l_2 на рисунке 3). Чем больше характеристическое расстояние, тем больше прокаливаемость. Так как $l_1 > l_2$, то сталь 1 имеет большую прокаливаемость чем сталь 2.

По характеристическому расстоянию с помощью специальных номограмм можно определить критические диаметры для деталей различной формы и размеров, охлаждаемых при закалке погружением в разные среды. В изделиях, имеющих $\varnothing < 25$ мм, прокаливаемость часто определяется не по распределению твердости, а по виду излома (на микроструктуре хорошо видны границы мартенситной зоны).

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1 Нагреть образцы до температуры закалки 840...860° С и выдержать 30 минут.

2.2 Быстро перенести образец в установку, закрепить его в кронштейне.

2.3 Охладить торцовую поверхность образца струей воды, имеющей температуру 18...20° С. При этом по мере удаления от торца скорость охлаждения образца по его длине уменьшается.

2.4 После полного охлаждения образец снять, сошлифовать по его длине полосу шириной 2 мм и, начиная от торца, через каждые 1,5...2 мм измерить твердость на приборе Роквелла по шкале HRC. Сделать не менее 20 измерений. Полученные результаты занести в протокол испытаний (приложение А, таблица 1).

2.5 По данным замера твердости у образцов различных марок стали построить для них графики изменения твердости в зависимости от расстояния до торца (приложение А, рисунок 1).

2.6 По таблице 1 для исследуемых сталей определить твердость их полумартенситной зон.

2.7 Определив твердость полумартенситных зон, найти глубину прокаливаемости исследуемых сталей l_1 и l_2 в мм. Полученные результаты занести в протокол испытаний (приложение А, таблица 2).

2.8 По найденным значениям l_1 и l_2 по номограмме определить критические диаметры в зависимости от среды охлаждения (при $L/D = 10$). Полученные результаты занести в протокол испытаний (приложение А, таблица 2).

3 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

3.1 Краткие теоретические сведения.

3.2 Схема установки для определения прокаливаемости методом торцовой закалки.

3.3 Протокол испытаний.

3.4 Выводы о проделанной работе.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Прокаливаемость – определение.
- 2 Факторы, влияющие на прокаливаемость стали.
- 3 Порядок измерения твердости при торцовой закалке.
- 4 Какие стали имеют большую прокаливаемость и почему?
- 5 Как определить критические диаметры для деталей различной формы и размеров?
 - 6 Какая связь между прокаливаемостью и скоростью охлаждения?
 - 7 Как определить глубину прокаливаемости зная твердость?
 - 8 Реальный критический диаметр – определение.
 - 9 Как влияет размер зерна на прокаливаемость?
 - 10 При каком условии выполняется сквозная прокаливаемость?

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица 1 – Протокол измерения твердости по длине образца

Марка стали			
N измерений	Расстояние от закаливаемого торца, мм	Твердость, HRC	
1			
2			
...			



Рисунок 1 – Кривые прокаливаемости

Таблица 2 – Результаты испытаний на прокаливаемость

Марка стали	Твердость полумартенситной зоны, HRC	Глубина прокаливаемости l , мм	Критический диаметр D_K , мм

Список литературы

1. Михальченков А.М., Козарез И.В., Феськов С.А. Технология ремонта машин: учебное пособие. М.: Кнорус, 2023. 368 с.
2. Королев А.П., Мордасов Д.М., Макаручук М.В. Термическая и химико-термическая обработка стали: учебное пособие: в 2 ч. Ч. 1: Термическая обработка стали. Тамбов: ТГТУ, 2021. 2021. 98 с.
3. Черноиванов В.И., Лялякин В.П., Голубев И.Г. Организация и технология восстановления деталей машин. М.: ФГНУ «Росин-формагротех», 2016. 568 с.
4. Быченин А.П., Володько О.С. Триботехника и триботехнологии: учебное пособие. Самара: СамГАУ, 2018. 247 с.
5. Бургонова О.Ю., Акимов В.В. Термическая обработка: учебное пособие. Омск: ОмГТУ, 2016. 114 с.
6. Инженерное материаловедение : учебное пособие / В.В. Перинский, И.В. Перинская, С.Г. Калганова, С.Б. Вениг. Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2023. 363 с.
7. Ратников Д.Г. Основы теории индукционного нагрева (тепловые расчеты при индукционном нагреве) // Индукционный нагрев. 2008. № 1 (3). С. 43-47.
8. Моделирование контактного взаимодействия элементов системы "наполнитель-полимер" при различных условиях термообработки композиционного материала / Ю.К. Машков, О.В. Кропотин, О.А. Мамаев, В.А. Егорова // Материаловедение. 2008. № 6. С. 13-20.
9. Полевой Г.В., Сухинин Г.К. Газопламенная обработка металлов. М.: Академия, 2005. 336 с.
10. Моряков О.С. Материаловедение. М.: Академия, 2013. 288 с.
11. Оптимизация технологии лазерного термоупрочнения / А.А. Баркун, С.Ф. Кукин, А.С. Кукин, О.Г. и др. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия в: промышленность. Прикладные науки. 2008. № 8. С. 51–57.

12. Синькевич Ю.В., Янковский И.Н. Исследование механизма прохождения электрического тока через парогазовую оболочку при анодном процессе // Прогресивні технології і системи машинобудування. 2011. № 1 (41). С. 287–292.
13. Каган А.М., Горштейн В. Активная поверхность для тепло-массообменных процессов. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 120 с.
14. Пейсахов А.М. Кучер А.М. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник для студентов немашиностроит. спец. 3-е изд. СПб.: Изд-во Михайлова В.А., 2005. 416 с.
15. Околович Г.А., Сизова А.Е., Мустафина Т.В. Межкритическая закалка // Ползуновский Вестник. 2012. № 1-1. С. 228–231.
16. Леонтьев П.А., Симонов Ю.Н., Иванова А.С. Исследование фазовых превращений и структуры кремнистых сталей с различным содержанием углерода при непрерывном охлаждении // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Машиностроение, материаловедение. 2013. Т. 15, № 4. С. 33–39.
17. Сычков А.Б., Малашкин С.О. Оборудование и технология для термомо-правки - термоме-ханического упрочнения фасонного профиля // Теория и технология металлургического производства. 2014. № 2. С. 96–100.
18. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. Исследование механизма образования зародышей мартенсита при закалке в магнитном поле // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 3. С. 4–7.
19. Сильман Г.И., Горленко О.А. Триботехническое материаловедение и триботехнология. М.: Машиностроение, 2006. 348 с.
20. Разработка и промышленное освоение энергосберегающей технологии производства листов из низколегированных сталей / Г.Н. Филимонов, В.И. Стольный, М.И. Оленин и др. // Вопросы материаловедения. 2004. № 3. С. 28–33.
21. Федин В.М. Объемно-поверхностная закалка деталей подвижного состава и верхнего строения пути. М.: Интекс, 2002. 208 с.

Учебное издание

Михальченков Александр Михайлович
Феськов Сергей Александрович

Термоупрочнение стальных деталей

Учебное пособие для выполнения лабораторных работ
по дисциплине «Материаловедение и технология конструкционных материалов»
для студентов очной и заочной форм обучения высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 Агроинженерия

Редактор Лебедева Е.М.
Компьютерная верстка Феськов С.А.

Подписано к печати 24.10. 2023 г. Формат 60x84. 1/16.

Бумага печатная Усл.п.л. 3,25. Тираж 150 экз. Изд. №7589

Издательство Брянского государственного аграрного университета
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ