

УДК 620.178.746.22

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ МАТЕРИАЛА ЯКОРНОЙ ЦЕПИ В ПЕРИОД РЕМОНТА

Петров Кирилл Эдуардович¹, магистрант
e-mail: petrov_kirill2001@mail.ru

¹ Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены методика и результаты экспериментального определения ударной вязкости образцов из стали 20Х, вырезанных из бывшей в эксплуатации якорной цепи 22-2/2а ГОСТ 228-79. Испытания проводились на маятниковом копре в соответствии с ГОСТ 9454-78. Выполнено сравнение результатов испытаний термически обработанных и исходных образцов. Установлено, что термическая обработка приводит к существенному повышению ударной вязкости: среднее значение возрастает, а разброс значений значительно сокращается. Полученные результаты подтверждают эффективность отжига в период ремонта для восстановления сопротивления материала хрупкому разрушению и устранения эксплуатационной неоднородности.

Ключевые слова: якорная цепь, сталь 20Х, отжиг, ударная вязкость, судоремонт.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON IMPACT TOUGHNESS OF ANCHOR CHAIN MATERIAL DURING REPAIR

Kirill E. Petrov¹, Master's Degree student
e-mail: petrov_kirill2001@mail.ru

¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The methodology and results of experimental determination of impact toughness of 20Kh steel specimens cut from an in-service anchor chain 22-2/2a GOST 228-79 are presented. The tests were carried out on a pendulum impact testing machine in accordance with GOST 9454-78. A comparison of test results for heat-treated and as-received specimens was performed. It has been established that heat treatment leads to a significant increase in impact toughness: the average value rises, and the scatter of values is considerably reduced. The obtained results confirm the effectiveness of annealing during repair for restoring the material's resistance to brittle fracture and eliminating service-induced heterogeneity.

Keywords: anchor chain, 20Kh steel, annealing, impact toughness, ship repair.

В процессе длительной эксплуатации материал звеньев, изготовленных, в частности, из стали 20Х, подвергается воздействию циклических нагрузок, коррозионной среды и ударных воздействий, приводящих к накоплению усталостных повреждений, поверхностному наклепу и росту внутренних напряжений. Восстановление исходных механических характеристик и снятие остаточных напряжений в судоремонтной практике традиционно достигается применением термической обработки, а именно различных видов отжига или отпуска [1].

Однако, как показали проведенные исследования, процесс термической обработки якорных цепей категории прочности 2 (сталь 20Х) в диапазоне температур 550–650 °С, направленный на рекристаллизацию деформированной структуры, способен приводить к нежелательным побочным эффектам. В частности, при последующем приложении регламентированной пробной нагрузки фиксируется изменение геометрических параметров — вытяжка звеньев, превышающая допустимые отклонения, что косвенно свидетельствует о непрогнозируемом снижении предела текучести материала относительно исходного или наклепанного состояния. Явление ставит под сомнение эффективность применяемых режимов отжига с точки зрения сохранения заданных прочностных свойств и требует детального анализа поведения материала непосредственно в процессе нагружения [2].

Механические свойства образцов, определенные путем медленного повышения нагрузки, во многих случаях не соответствуют действительным условиям нагружения деталей в работе, когда нагрузка возрастает очень быстро. Поэтому возникает необходимость исследовать свойства металла при ударе. Так как в некоторых случаях невозможно достаточно точно определить нагрузку (напряжение), то обычно при ударных испытаниях определяют работу, затрачиваемую на разрушение образца. Количество работы, поглощенной образцом при разрушении ударом, зависит от пластичности испытуемого материала, формы и размера образца, расстояния между опорами, формы надреза [4].

Настоящая работа является логическим продолжением исследований влияния термической обработки на механические свойства материала якорных цепей при ремонте.

Методика эксперимента

Испытанию подлежали образцы из стали 20Х, изготовленные из бывшей в эксплуатации электросварной якорной цепи со вставными контрфорсами калибром 22 мм., 2-й категории прочности. Предварительно выполнена термическая обработка десяти образцов в муфельной печи марки SNOL 30/1100 с электронным терморегулятором, представленная на рисунке 1. Режим термической обработки деталей якорных цепей – отжиг. Детали якорной цепи, помещенные в муфель, нагревались до температуры 550°С - 650°С. Далее выдерживались при заданной температуре в топке печи 33 минуты, из расчета – 1,5 минуты на 1 мм диаметра. После выдержки произведено медленное охлаждение деталей с печью.





Рисунок 1 – Муфельная печь марки SNOL 30/1100

Для испытаний применены образцы с концентратором вида V, изготовленные в соответствии с ГОСТ 9454 – 78, представленные на рисунке 2.



Рисунок 2 – Образцы для испытаний на ударный изгиб

Работа излома определяется на специальных маятниковых копрах (рис. 3). Перед испытанием маятник отводится на определенный угол, а затем отпускается и падает. При падении маятник разрушает образец, помещенный на опорах копра, и, продолжая двигаться по инерции, поднимается на некоторый угол. Этот угол взлета маятника отсчитывается по положению стрелки на шкале соответствующего указателя [4].

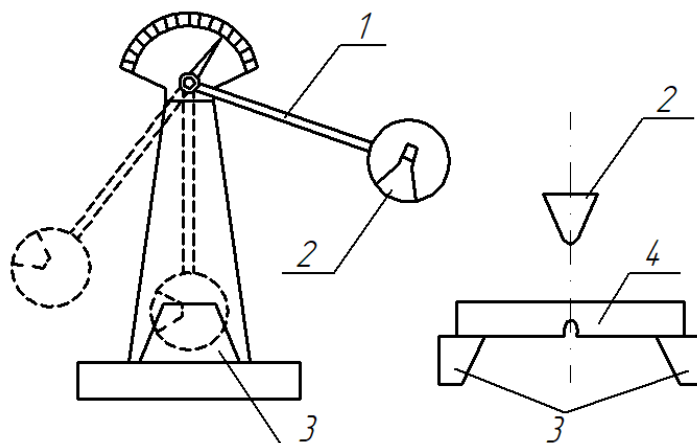


Рисунок 3 - Схема испытания образцов на ударную вязкость:
1 - маятник копра; 2 – нож маятника; 3 – опоры; 4 – образец

Работа, затраченная на разрушение образца, принимается равной разности энергии маятника в его положениях до и после удара [3]:

$$A = G \cdot (H - h), \quad (1)$$

где A – работа разрушения образца, Дж;

G – вес маятника, Н;

H – высота подъема до удара, м;

h – высота взлета маятника после удара, м.

Работа удара A определяется по шкале, укрепленной на испытательном копре и градуированной в килограммометрах или по таблицам, имеющимся на каждом маятниковом копре.

Ударная вязкость a (Дж/м²) характеризуется работой, расходуемой на ударный излом образца A , отнесенной к площади поперечного сечения F_0 образца в месте надреза [3]:

$$a = \frac{A}{F_0}. \quad (2)$$

Результаты испытаний на ударный изгиб представлены на рисунке 4.

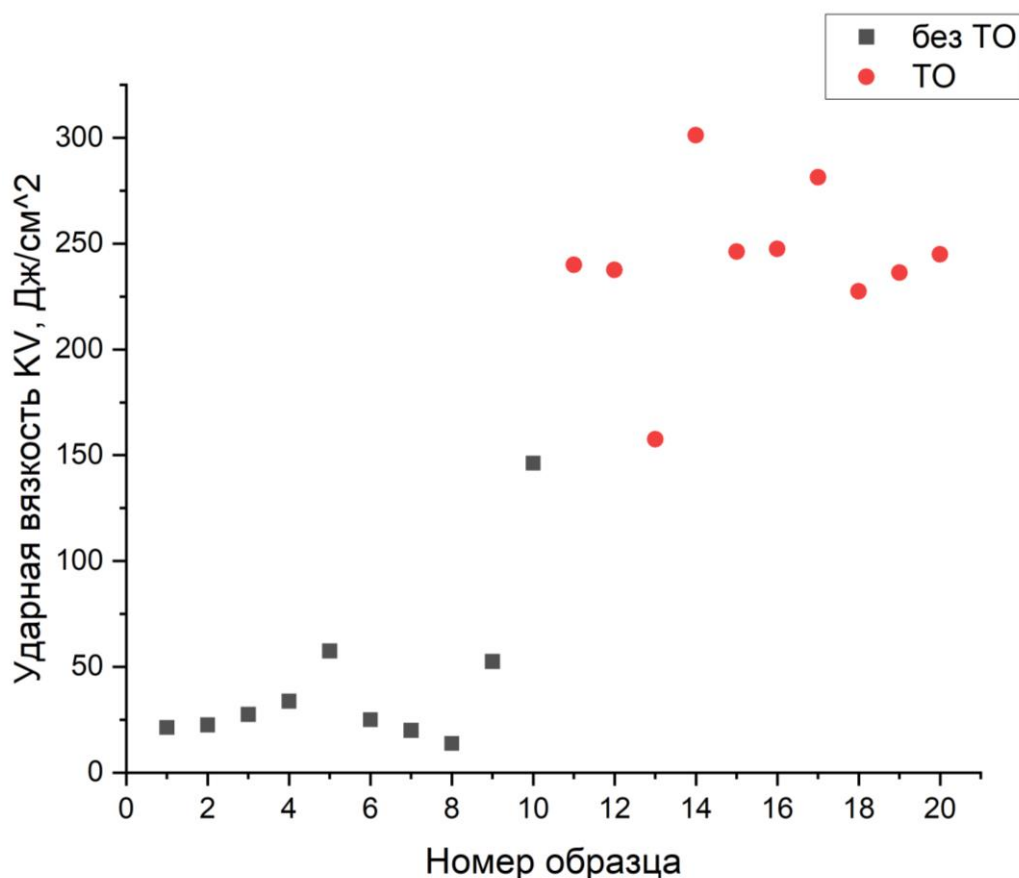


Рисунок 4 – Результаты испытаний термически обработанных (ТО) и исходных образцов (без ТО)

Ударная вязкость зависима от изменения структуры металла. Так, укрупнение зерна, незначительно отражающееся на статических свойствах металлов и сплавов, резко повышает способность к хрупкому разрушению.

Выводы

Проведенный отжиг привел к повышению показателя ударной вязкости. У исходных образцов среднее значение ударной вязкости составило около 62 Дж/см², у термически обработанных образцов этот показатель возрос в среднем до 242 Дж/см², то есть практически в 3,9 раза. Низкие показатели ударной вязкости исходных образцов свидетельствуют о наличии в материале цепи локальных зон с наклепом, внутренними напряжениями и, возможно, признаками деформационного старения. После термической обработки значения ударной вязкости существенно увеличились, что может говорить о гомогенизации структуры и снятии остаточных напряжений, обеспечивающих равномерный высокий запас пластичности по всему объему металла.

Режим термообработки (нагрев до 550–650 °С) успешно ликвидировал дефекты кристаллической решетки, накопленные в процессе длительной эксплуатации, и способствовал формированию структуры с высокой энергоемкостью разрушения.

Несмотря на выявленное ранее нежелательное явление вытяжки звеньев под статической нагрузкой из-за снижения предела текучести, с точки зрения динамической прочности термическая обработка якорных цепей является высокоэффективной операцией. Без ее проведения отдельные звенья цепи находятся в охрупченном состоянии и могут

разрушиться внезапно при приложении ударных нагрузок, что недопустимо для обеспечения безопасности якорной стоянки судна.

Для изучения влияния термической обработки на механические свойства материалов якорных цепей, в частности предела текучести, планируется провести инженерный эксперимент.

Список литературы:

1. Мешков А.С. Термическая обработка при освидетельствовании и ремонте якорных цепей кораблей и судов: проблемы и пути решения // Морской вестник. 2022. №4(84) с.34 – 36.
2. Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». 06–20 октября 2025 года. Том 2. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2025. с.71 – 76.
3. ГОСТ 9454 – 78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.
4. Гуляев А. П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

