

ВЛИЯНИЕ ОДИНАРНОГО И ДВОЙНОГО СТАРЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 06ХН28МДТ

Аустенитные стали являются одним из основных конструкционных материалов, который находит широкое применение в машиностроении, приборостроении и других отраслях техники благодаря высоким механическим и технологическим свойствам в широком диапазоне температур. Однако в процессе охлаждения и деформации некоторые стали данного класса проявляют склонность к фазовым превращениям, которые не всегда однозначно влияют на их свойства при различных видах нагружения. Статья посвящена анализу результатов экспериментальных исследований стали 06ХН28МДТ, подвергнутой термомеханической обработке.

Известно, что старение является весьма эффективным методом упрочнения аустенитных сталей [1]. Старение никелевых и хромо-никелевых сталей при разных температурах и продолжительностях изотермических выдержек обуславливает различную кинетику старения [1, 2, 3] и позволяет исследовать влияние этого процесса на стабильность и механизм разрушения вышеуказанных сталей при различных видах нагружения.

В качестве исследуемого материала выбрана аустенитная сталь 06ХН28МДТ. Химический состав стали представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав исследуемой стали (в % по массе)

| Сталь | C | Mn | Cr | Ni | Mo | Ti | Cu |
|-----------|------|------|------|-------|------|------|------|
| 06ХН28МДТ | 0,06 | 0,30 | 1,20 | 28,40 | 0,70 | 0,80 | 0,35 |

Сталь была выплавлена в открытой индукционной электропечи. Слитки подвергли гомогенизации при температуре 1200°С в течение 24 часов, затем ковали на прутки и закаливали при температуре от 1050 до 1150°С в воде. После закалки сталь 06ХН28МДТ имела однофазную аустенитную структуру. Охлаждение до температуры (-196°С) не приводило к мартенситным превращениям. После закалки средний размер аустенитного зерна составлял $2,7 \cdot 10^{-5}$ м.

Механические испытания образцов включали в себя:

– испытания на твердость образцов закаленной и состаренной сталей на автоматическом прессе Бринелля ТШ-2М;

– испытания на растяжение согласно ГОСТ 1497–84 цилиндрических образцов

диаметром $5 \cdot 10^{-3}$ м на машине ИМ-4Р для определения стандартных характеристик сталей в закаленном и состаренном состояниях;

– испытание на ударную вязкость образцов с «U» и «V»-образными концентраторами напряжений в интервале температур от (-196°С) до 20°С на маятниковом копре МК-30 согласно ГОСТ 9454-78.

Исследования изломов включали в себя макрофрактографический анализ и рентгеноструктурный анализ изломов на дифрактометре ДРОН-2,0 в Fe K α -излучении [4, 5].

На рисунке 1 представлена зависимость твердости (НВ) стали 06ХН28МДТ от продолжительности старения при 700°С и 750°С.

Из приведенного рисунка видно, что с увеличением продолжительности старения при температуре 700°С твердость стали 06ХН28МДТ возрастает и достигает максимального значения (2200 НВ) после 14–16

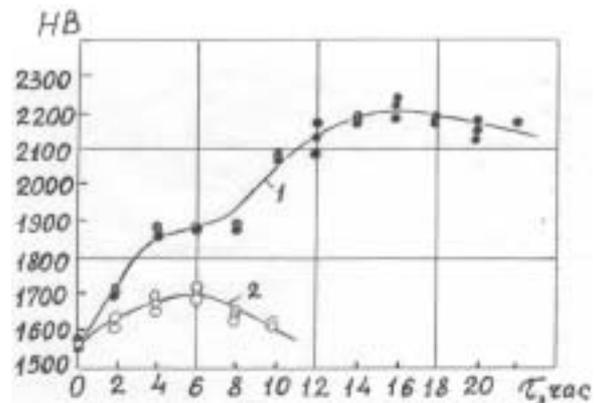


Рисунок 1. Зависимость твердости аустенитной стали 06ХН28МДТ от продолжительности старения при 700 и 750°С:

- 1 – Закалка с 1050°С (0,5 час.) + 700°С (ф);
- 2 – Закалка с 1050°С (0,5 час.) + 750°С (ф)

часов старения, что соответствует увеличению твердости в 1,4 раза. При дальнейшем увеличении продолжительности старения твердость стали начинает снижаться. По-видимому, при продолжительности старения до 16 часов в структуре аустенита происходит выделение в основном сравнительно мелких частиц второй фазы, когерентно связанных с матрицей, а при продолжительности старения более 16 часов происходит коагуляция частиц и, возможно, нарушение когерентности границ второй фазы и матрицы, т. е. наблюдается эффект перестаривания [1, 3].

Старение при температуре 750°C приводит к незначительному повышению твердости стали. По-видимому, при более высокой температуре старения происходит интенсификация диффузионного процесса выделения и коагуляции частиц второй фазы, а также нарушение когерентности межфазных границ, что приводит к небольшому, всего в 1,1 раза, возрастанию твердости и ее уменьшению при старении более 6 часов.

Таким образом, очевидно, что оптимальным режимом упрочняющей термической обработки исследуемой стали можно считать старение при 700°C в течение 14 часов.

Рассмотрено влияние двойного старения на твердость стали. Старение проводили по следующим режимам:

- а) (700°C , 14 час.) + (750°C , τ);
- б) (750°C , 6 час.) + (700°C , τ).

Продолжительность первого старения соответствовала режиму достижения максимальной твердости данной стали при одинарном старении. На рисунке 2 показана зависимость твердости (НВ) стали от продолжительности двойного старения.

Графики рисунка 2 подтверждают, что высокотемпературное старение после низкотемпературного приводит к резкому снижению твердости стали. Уже после одночасовой выдержки при 750°C твердость стали уменьшается в 1,2 раза (кривая 1). По-видимому, огрубление структуры происходит при указанной температуре старения достаточно быстро, что способствует разупрочнению материала. Использование же низкотемпературного старения после высокотемпературного (кривая 2) приводит к повышению

твердости стали. Причем после 14-часовой выдержки при температуре 700°C твердость стали становится примерно равной твердости, полученной при однократном старении данной стали при температуре 700°C (рис. 1).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что оптимальными режимами упрочняющей термической обработки аустенитной стали 06ХН28МДТ являются либо закалка от 1050°C + однократное старение при 700°C (14 час.), либо двойное старение 750°C (6 час.) + 700°C (14 час.) Во избежание разупрочнения стали температура эксплуатации закаленной стали не должна превышать 700°C .

Зависимость механических свойств стали 06ХН28МДТ от режимов термической обработки представлена в табл. 2. Видно, что по сравнению с закаленным состоянием прочностные характеристики состаренной стали возрастают. Предел текучести образцов после двойного старения выше, чем после одинарного, а пределы прочности практически одинаковы. Значение относительного удлинения « δ » после одинарного старения уменьшается по сравнению с закаленным состоянием, но после двойного старения увеличивается и даже превышает уровень « δ » закаленного образца. Значение относительного сужения « ψ » после старения уменьшается, причем после двойного старения оно меньше, чем после одинарного. Следует отметить, что образцы, испытанные на растяжение после двойного старения, становятся магнитными в области излома. Возможно, в процессе растяжения в зоне локализации де-

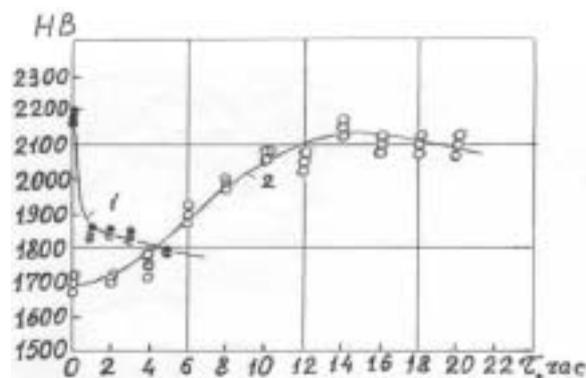


Рисунок 2. Зависимость твердости стали 06ХН28МДТ от продолжительности двойного старения:
1 – Закалка с 1050°C + 700°C (14 час.) + 750°C (φ);
2 – Закалка с 1050°C + 750°C (6 час.) + 700°C (φ)

Таблица 2. Механические свойства стали 06ХН28МДТ после различных видов термической обработки

| Режим термической обработки | $\sigma_{в}$, МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | ψ , % |
|--|--------------------|----------------------|--------------|------------|
| Закалка от 1050° С в воде | 700 | 440 | 30 | 63 |
| Закалка от 1050° С в воде + старение: 700° С (14 час.) | 870 | 530 | 18 | 54 |
| Закалка от 1050° С в воде + старение: 750° С (6 час.) + 700° С (14 час.) | 860 | 590 | 30 | 50 |

формации протекают мартенситные превращения, которые, по-видимому, обуславливают и повышение предела текучести и значения относительного удлинения.

Цилиндрические образцы стали 06ХН28МДТ как в закаленном, так и в состаренном состояниях разрушаются вязко. Разрушение происходит либо под углом 45° к оси образца, либо по схеме «чашка-конус». Центральная часть таких изломов матовая (рис. 3).

Для испытаний на ударную вязкость использовали образцы стали 06ХН28МДТ после старения при температуре 700° С, а также при 750° С (6 час.) + 700° С (с разной продол-

жительностью выдержки). Испытания проводили при комнатной температуре. Зависимость ударной вязкости от режимов термической обработки представлена на рисунке 4. Видно, что при всех выбранных режимах старения с увеличением продолжительности старения ударная вязкость снижается, оставаясь на уровне не ниже 1,0 МДж/м². С увеличением продолжительности старения значения величин утяжки и губ среза на поверхности изломов уменьшаются (рис. 5). Изменяется и механизм разрушения стали в центральной части изломов от вязкого (волоконистый излом) к смешанному (матовый излом).

Рассмотрено влияние одинарного и двойного старения на степень искаженности кристаллической структуры материала на поверхности центральной части ударных изломов стали 06ХН28МДТ, полученных при комнатной температуре. О степени искаженности кристаллической структуры материала судили по величине физического уширения рентгеновской дифракционной линии (311) К_α γ-фазы (табл. 3).

Видно, что с увеличением времени старения стали, несмотря на снижение ударной

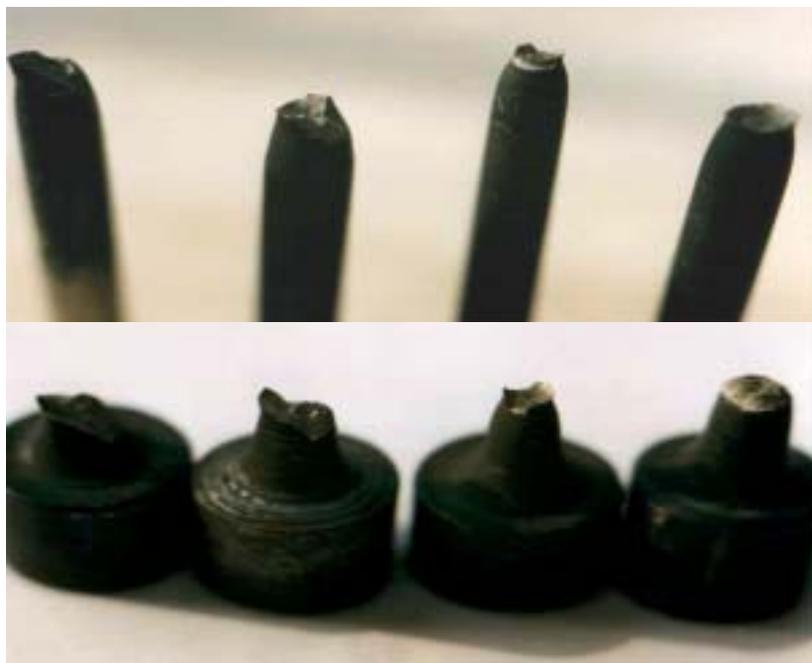


Рисунок 3. Строение изломов образцов закаленной и состаренной аустенитной стали 06ХН28МДТ после испытаний на растяжение (слева направо):
1 – Закалка от 1050° С; 2, 3 – Закалка от 1050° С + 700° С (14 час.);
4 – Закалка от 1050° С + 750° С (6 час.) + 700° С (14 час.)

вязкости, уменьшения утяжки образцов и размеров губ среза (рис. 4 и 5), степень искаженности кристаллической структуры материала на поверхности изломов не только не снижается, но, в отдельных случаях, даже несколько увеличивается (см. табл. 3).

Рассмотрено влияние температуры испытания на ударную вязкость (рис. 6) и механизм ударного разрушения состаренной стали 06ХН28МДТ.

Из рисунка 6 видно, что с понижением температуры испытания ударная вязкость стали, как после одинарного, так и после двойного старения, уменьшается. При всех температурах испытания ударная вязкость стали, состаренной по одинарному режиму, выше, чем стали, состаренной по двойному режиму.

Центральная часть всех изломов, полученных как при комнатной, так и при низких температурах, сравнительно ровная, имеет матовый цвет. Значения утяжки и размеров губ среза на поверхности изломов с понижением температуры испытания равномерно уменьшаются (рис. 7), что указывает на охрупчивание состаренной стали при понижении температуры испытания. Об этом же свидетельствуют и температурные зависимости уширения рентгеновской дифракционной линии, полученной при рентгенографировании центральной части

Таблица 3. Ширина β , физическое уширение $\Delta\beta$ и отношение β/β_0 дифракционной линии (311) K_α г-фазы, полученной при съемке поверхности ударных изломов стали 06ХН28МДТ после различных режимов термической обработки

| Режим термической обработки | Надрез | β , 10^{-2} рад | $\Delta\beta$, 10^{-2} рад | β/β_0 |
|---|--------|-------------------------|-------------------------------|------------------|
| | | (311) K_α | (311) K_α | (311) K_α |
| Закалка, 1050°C в воде | V | 4,1 | 3,00 | 1,47 |
| | U | 4,5 | 3,33 | 1,63 |
| Закалка от 1050 °С + старение: 700 °С (6 час.) | V | 4,3 | 3,90 | 2,38 |
| | U | 4,6 | 4,23 | 2,54 |
| Закалка от 1050 °С + старение: 700 °С (14 час.) | U | 4,6 | 4,36 | 3,13 |
| Закалка от 1050 °С + старение: 750 °С (6 час.) + 700 °С (8 час.) | U | 3,84 | 3,60 | 2,89 |
| Закалка от 1050 °С + старение: 750 °С (6 час.) + 700 °С (14 час.) | U | 3,42 | 3,69 | 4,18 |

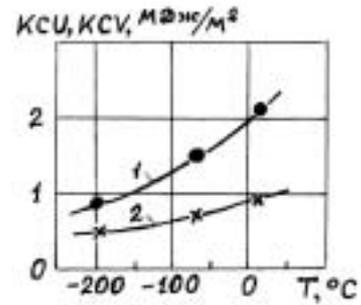


Рисунок 6. Температурная зависимость ударной вязкости состаренной аустенитной стали 06ХН28МДТ:
1 – Закалка от 1050 °С + старение: 700 °С (14 час.);
2 – Закалка от 1050 °С + старение: 750 °С (6 час.) + 700 °С (14 час.)

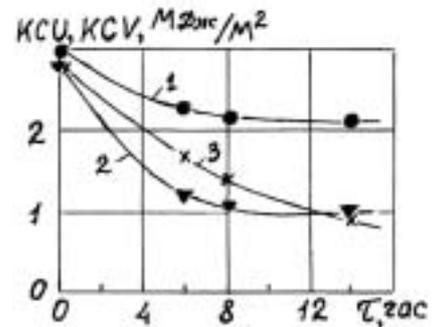


Рисунок 4. Зависимость ударной вязкости стали 06ХН28МДТ при комнатной температуре от продолжительности одинарного и двойного старения:
1 – Закалка с 1050 °С + 700 °С (ф) (KCU); 2 – Закалка с 1050 °С + 700 °С (ф) (KCV); 3 – Закалка с 1050 °С + 750 °С (6 час.) + 700 °С (ф) (KCU)

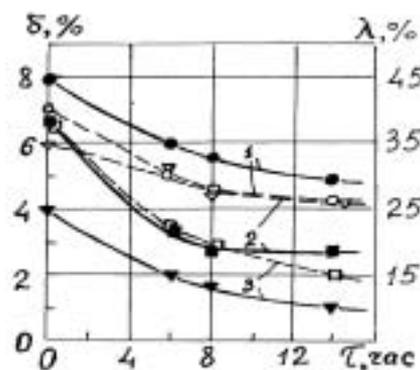


Рисунок 5. Зависимость утяжки вблизи изломов ударных образцов аустенитной стали 06ХН28МДТ, испытанной при комнатной температуре, от продолжительности одинарного и двойного старения:
1 – Закалка с 1050 °С + 700°C (ф), U-образный надрез; 2 – Закалка с 1050 °С + 700 °С (ф), V – образный надрез; 3 – Закалка с 1050 °С + 750 °С (6 час.) + 700 °С (ф), U-образный надрез

изломов ударных образцов состаренной стали (рис. 8).

Таким образом, на основании анализа приведенных результатов испытаний можно сделать следующие выводы:

– оптимальными режимами упрочняющей термической обработки аустенитной стали 06ХН28МДТ являются закалка от 1050°С + однократное старение при 700°С (14 час.) или двойное старение: 750°С (6 час.) + 700°С (14 час.);

– ударная вязкость стали при всех выбранных режимах упрочняющего старения снижается по сравнению с закаленным состоянием, оставаясь при этом на уровне не ниже 1,0 МДж/м²;

– с увеличением времени старения имеет место охрупчивание стали, причем степень искаженности кристаллической структуры материала в центральной части изломов, оцененная по уширению рентгеновской дифракционной линии, не только не уменьшается, но, в отдельных случаях, даже несколько увеличивается;

– с понижением температуры испытания от 20 до (-196°С) наблюдаются охрупчивание и снижение ударной вязкости состаренной стали.

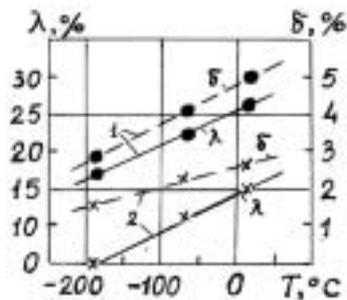


Рисунок 7. Температурная зависимость размера губ среза на поверхности изломов и утяжки образцов состаренной аустенитной стали 06ХН28МДТ
1 – Закалка с 1050 °С + старение: 700 °С (14 час.);
2 – Закалка с 1050 °С + старение: 750 °С (6 час.) + 700 °С (14 час.)

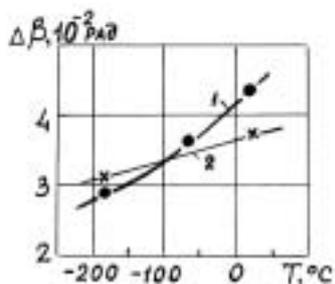


Рисунок 8. Температурная зависимость физического уширения дифракционной линии (311) Кб г-фазы при рентгенографировании поверхности центральной части ударных изломов состаренной аустенитной стали 06ХН28МДТ
1 – Закалка с 1050 °С + старение: 700 °С (14 час.);
2 – Закалка с 1050 °С + старение: 750 °С (6 час.) + 700 °С (14 час.)

Список использованной литературы:

1. Сагарадзе, В.В. Упрочнение аустенитных сталей / В.В. Сагарадзе, А.И. Уваров. - М.: Наука, 1989. - 270 с.
2. Клевцова, Н. А. Разрушение аустенитных сталей и мартенситные превращения в пластических зонах / Н.А. Клевцова, О.А. Фролова, Г.В. Клевцов. - М.: Академия Естествознания, 2005. - 155 с.
3. Келли, А. Дисперсионное твердение / А. Келли, Р. Никлсон. - М.: Металлургия, 1966. - 400 с.
4. Клевцов, Г.В. Пластические зоны и диагностика разрушения металлических материалов / Г.В. Клевцов. – М.: МИСИС, 1999. - 112 с.
5. Р 50-54-52-88. Расчеты и испытания на прочность. Метод рентгеноструктурного анализа изломов. Определение глубины зон пластической деформации под поверхностью разрушения. - М.: ВНИИНМАШ Госстандарта СССР, 1988. - 24 с.

20.11.06 г.