

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТПУСКА ПОСЛЕ АУСФОРМИНГА НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 10ХГМТ

А.С. Луговская, А.С. Долженко, А.Н. Беляков

Белгородский государственный национальный исследовательский университет
1319927@bsu.edu.ru

Аннотация. Рассмотрено влияние температуры отпуска после аусформинга на микроструктуру и механические свойства высокопрочной низколегированной стали 10ХГМТ (мас. %: Fe-0,15%С-0,46%Si-1,32%Mn-1,42%Cr-0,45%Mo-0,42%Cu-0,17%Ti). Средний размер субзерен слабо зависит от температуры отпуска и составляет 1,3–1,8 мкм. С повышением температуры отпуска от 550 до 650°С предел текучести уменьшается от 730 МПа до 640 МПа, в то время как пластичность увеличивается с 15 до 18,6 %.

Ключевые слова: Высокопрочная сталь, аусформинг, микроструктура, предел текучести

Введение

Низколегированные стали широко используются как конструкционные материалы в строительстве и машиностроении. Начиная с середины прошлого века, большое внимание уделяется термической и термомеханической обработке в сочетании с модифицированием химического состава высокопрочных низколегированных сталей с целью получения определенной микроструктуры, которая должна обеспечивать высокий уровень прочности и ударной вязкости. Было замечено, что удивительно высокая прочность может быть получена в низколегированных углеродистых сталях путем горячей обработки аустенита перед мартенситным (или бейнитным) превращением [1–3]. Такая низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО), включающая деформацию метастабильного аустенита, получила в зарубежной литературе название аусформинг [4]. Аусформинг заключается в том, что пластическую деформацию проводят в диапазоне температур от A_{C1} до M_s с последующей закалкой до мартенсита перед превращением бейнита/перлита. Затем мартенсит в таких сталях подвергается обычному отпуску. Было высказано предположение, что структурные механизмы, ответственные за превосходную прочность благодаря аусформингу, связаны с прямым наследованием мартенситом дефектов, возникающих при горячей обработке аустенита [3, 5].

Материал и методики проведения исследования

Исследуемая сталь 10ХГМТ с химическим составом Fe-0,15%С-0,46%Si-1,32%Mn-1,42%Cr-0,45%Mo-0,42%Cu-0,17%Ti была подвергнута термомеханической обработке – аусформингу. Аусформинг заключался в нагреве заготовки до 850°C, прокатке в один проход со степенью обжатия 20%, охлаждение в воду. После аусформинга были проведены отпуска при температурах 550, 600 и 650°C в течение 1 часа с охлаждением на воздухе.

Количественный и качественный анализ микроструктуры проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения Quanta 600, с помощью программы TSL OIM Analysis 6. Границы с углом разориентировки менее 2° в исследованиях не учитывались. Образцы для электронной микроскопии готовили методом электрохимической полировки с помощью электролита, состоящего из 10% хлорной кислоты и 90% уксусной кислоты, при напряжении 20В с использованием специальной установки TENUMPOL-5.

Для определения механических свойств были проведены механические испытания на растяжение. Испытания на определение статических свойств при комнатной температуре проводили в соответствии с ГОСТ 1497-84. Испытания проводились при скорости 2 мм/мин на пропорциональных плоских образцах с размером рабочей части 1,5×3×12 мм на универсальной напольной электромеханической испытательной машине Instron 5882 с автоматической регистрацией значений деформирующей нагрузки и удлинения образца. Измерения микротвердости проводились на твердомере Wolpert 402MVD с нагрузкой 300 г согласно ГОСТ 9450-76. В качестве индентора использовали четырехгранную алмазную пирамиду. Для получения наиболее достоверных результатов микротвердость образцов определяли при нагрузке 300 г. Время выдержки образцов под нагрузкой составляло 10 секунд.

Результаты исследований и их обсуждение

Полученная после аусформинга и отпусков микроструктура высокопрочной стали 10ХГМТ представлена на рисунке 1.

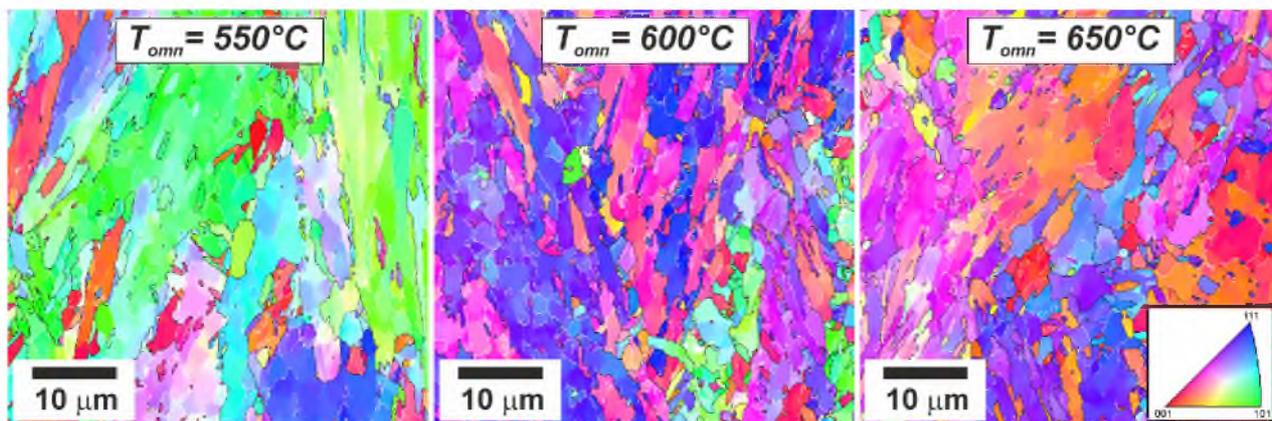


Рисунок 1. Микроструктура высокопрочной стали 10ХГМТ после проведения аустемпинга и отпуска при различных температурах

После аустемпинга и отпусков во всем температурном интервале высокопрочной стали 10ХГМТ наблюдается формирование структуры отпущенного мартенсита. Средний поперечный размер субзерен составляет 1,8, 1,3 и 1,7 мкм для образцов после отпусков при 550, 600, 650°C, соответственно. Доля высокоугловых границ составляет 49, 56 и 57% для образцов после отпусков при 550, 600, 650°C, соответственно. Следует отметить, что сформировавшиеся в результате аустемпинга зерна несколько вытянуты в направлении прокатки.

Графики зависимостей напряжения от удлинения, полученные после испытаний на растяжение при комнатной температуре высокопрочной стали 10ХГМТ, подвергнутой аустемпингу и отпускам при различных температурах, представлены на рисунке 2. После всех режимов обработок кривые растяжения образцов имеют одинаковый вид: после достижения предела текучести наблюдается равномерная стадия деформационного упрочнения до предела прочности с последующим образованием шейки и разрушением. С повышением температуры отпуска прочностные свойства снижаются: предел текучести уменьшается от 730 МПа до 640 МПа, в то время как пластичность увеличивается с 15 до 18,6 %.

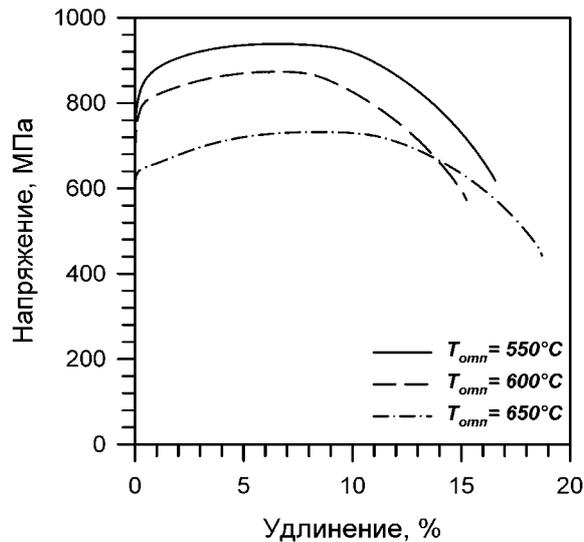


Рисунок 2. Диаграммы деформаций после испытаний на растяжение высокопрочной стали 10ХГМТ, подвергнутой аустемпфину и отпускам при различных температурах

В таблице представлены механические характеристики: предел текучести ($\sigma_{0,2}$), временное сопротивление разрыву (σ_B), удлинение (δ), полученные в результате испытаний на растяжение высокопрочной стали 10ХГМТ, подвергнутой аустемпфину и отпускам при различных температурах.

Таблица. Механические свойства высокопрочной стали 10ХГМТ после аустемпфина и различных температур отпуска

Температура отпуска, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	HV, МПа
550	730	900	15	3140
600	770	870	15,2	2970
650	640	730	18,6	2330

Микротвердость исследуемой высокопрочной стали 10ХГМТ также сильно зависит от температуры отпуска: увеличение температуры отпуска от 550 до 650°C приводит к снижению значений HV от 3140 МПа до 2330 МПа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00497)

Литература

1. Schmatz D. J., Zackay V. F. Development of ultra-high strength steel by deformation of undercooled austenite //MSHTM. – 1960. – Т. 2. – №. 7. – С. 417-418.

2. Kula E. B., Dhosi J. M. Effect of deformation prior to transformation on the mechanical properties of steel 4340 //Metal Science and Heat Treatment of Metals. – 1961. – Т. 3. – №. 5-6. – С. 225-229.
3. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов //М: Metallurgy – 1968. – 1171 с.
4. Mukherjee J. K. Thermomechanical ausforming technique for producing substitute ultra high strength steels. – 1966.
5. Schaller F. W., Schmatz D. J. The inheritance of defects by martensite //Acta Metallurgica. – 1963. – Т. 11. – №. 10. – С. 1193-1194.