

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ТЕМПФОРМИНГА

Долженко А.С., Беляков А.Н., Кайбышев Р.О.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород

Высокопрочные низколегированные стали являются широко используемыми конструкционными материалами. Одним из недостатков таких сталей является их относительно высокая температура хрупко-вязкого перехода в закаленном состоянии, что делает эти стали хрупкими при температурах ниже комнатной и, соответственно, ограничивает их применение при пониженных температурах. Оригинальный подход к решению данной проблемы был предложен группой японских ученых [1,2]. Предлагаемый ими способ заключается в теплой прокатке с большим обжатием после отпуска закаленного мартенсита. Теплую прокатку предлагалось проводить при температуре отпуска, этот метод обработки был назван темпформингом.

Исследования проводили на высокопрочной низколегированной стали 25ХГМТ следующего химического состава (мас. %): 0,26С, 0,23Si, 0,54Mn, 0,42Cr, 0,44Mo, 0,06Ti, остальное Fe. Предварительно сталь была подвергнута закалке в воду с 850°C. Темпформинг проводили следующим образом: стальные заготовки были нагреты до температуры отпуска (600 и 650°C), выдержаны при этой температуре в течении 1 часа, после чего подвергнуты прокатке при этой же температуре до истинной деформации 0,8 и 1,4. Испытания на растяжение проводили с использованием испытательной машины Instron 5882 при комнатной температуре на плоских образцах с длиной рабочей части 12 мм и поперечным сечением 3×1,5 мм². Испытания на ударную вязкость проводил на стандартных образцах квадратного сечения 10×10 мм² и длиной 55 мм с V-образным концентратором напряжений с использованием ударной машины Instron 450 J в интервале температур от 20 до -196°C.

Анализ инженерных кривых напряжение – удлинение (рис. 1а), показал, что увеличение температуры темпформинга приводит к снижению показателей прочности и повышению пластичности. При увеличении степени деформации при одинаковых температурах наблюдается рост пределов текучести и прочности, в то время как значения удлинения несколько снижаются. Форма кривых исследуемой стали во всех состояниях примерно одинакова. На начальной стадии наблюдается «зуб текучести», за которым следует довольно продолжительная стадия устойчивого течения, после чего происходит локализация деформации и образование шейки.

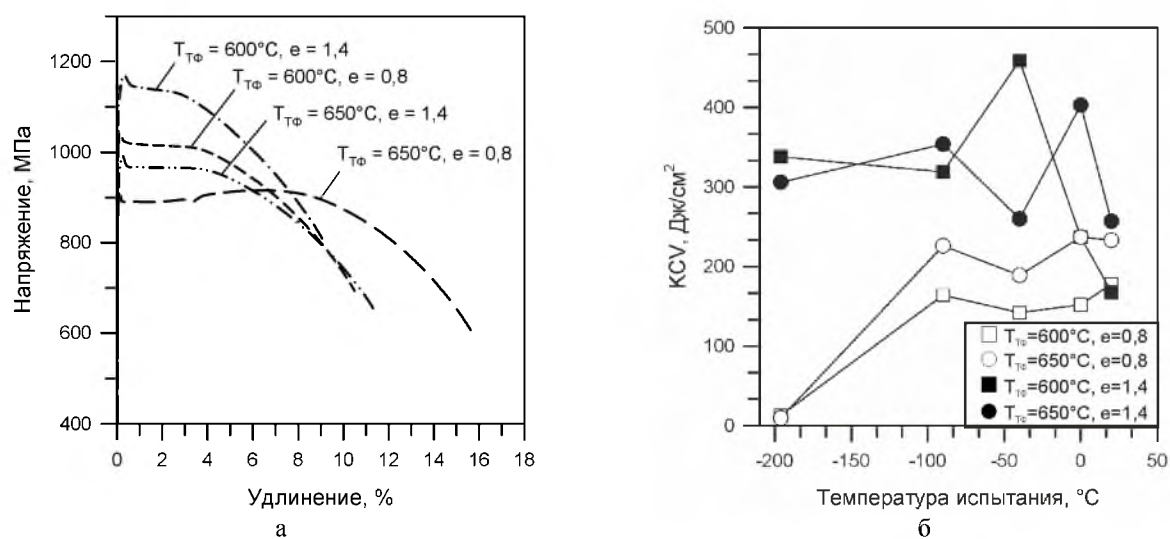


Рис. 1. Зависимость напряжения от удлинения (а) и значений КСУ от температуры испытания (б) стали 25ХГМТ, подвергнутой темпформингу по различным режимам

Сталь 25ХГМТ, подвергнутая темпформингу при различных температурах до истинной деформации $\epsilon = 0,8$, демонстрирует повышение значений ударной вязкости KCV с увеличением температуры темпформинга, а также повышение значений ударной вязкости при понижении температуры испытания до -90°C (рис. 1б). Темпформинг при температурах 600 и 650°C до истинной деформации $\epsilon = 1,4$ приводит к существенному повышению значений ударной вязкости, например $KCV_{-40^\circ\text{C}} \geq 460$ Дж/см². Даже при температуре жидкого азота образцы стали 25ХГМТ, подвергнутые темпформингу до $\epsilon = 1,4$, сохраняют значения ударной вязкости KCV выше 300 Дж/см², в отличие от образцов, подвергнутых темпформингу до $\epsilon = 0,8$, значения KCV которых не превышает 15 Дж/см².

Кривые нагрузка-смещение характеризуются острым пиком на ранней стадии ударного нагружения (рис.2), максимальное напряжение которого (P_M) совпадает со значением общей текучести (P_{CY}). Дальнейший изгиб образцов после темпформинга до $\epsilon = 0,8$ сопровождается постепенным уменьшением нагрузки до нуля. Величина пика на ранней стадии нагружения и скорость последующего уменьшения нагрузки увеличиваются с уменьшением температуры испытания. Образцы после темпформинга до $\epsilon = 1,4$ отличаются ярко выраженной стадией упрочнения после начального пика на кривой ударного нагружения с последующей стадией постепенного уменьшения нагрузки, наибольшая продолжительность которой наблюдается при температуре испытания ниже -40°C . Такое поведение свидетельствует о затуплении надреза за счет расщепления образца почти перпендикулярно к направлению удара на ранней стадии ударного нагружения без значительной пластической деформации. Увеличение степени деформации при темпформинге способствует расщеплению образцов вдоль плоскости прокатки при понижении температуры испытания, что ведет к необычному повышению ударной вязкости.

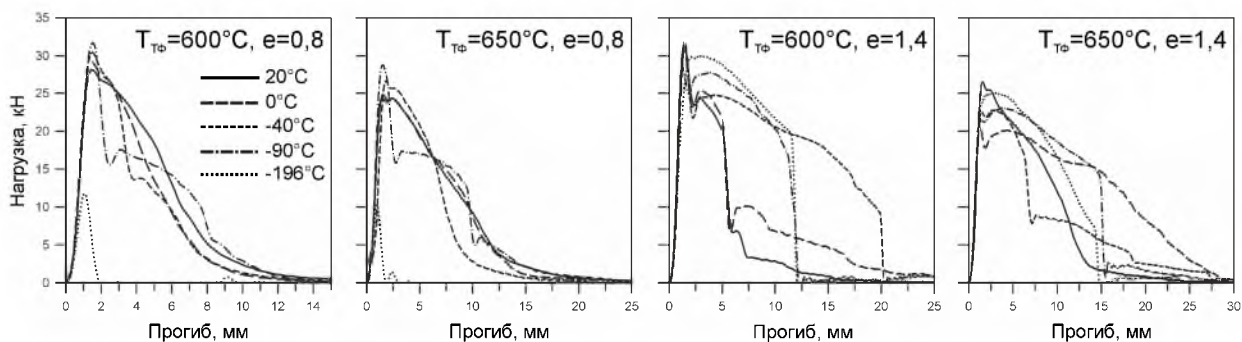


Рис.2. Изменение нагрузки в зависимости от прогиба образцов стали 25ХГМТ при испытаниях на ударную вязкость после темпформинга по различным режимам

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00497).

1. Kimura Y., Inoue T., Yin F., Tsuzaki K. Inverse temperature dependence of toughness in an ultrafine grain-structure steel // Science. 2008. №320. С. 1057-1060.
2. Kimura Y., Inoue T., Yin F., Sitdikov O., Tsuzaki K. Toughening of a 1500 MPa class steel through formation of an ultrafine fibrous grain structure // Scripta Mater. 2007. №57, С. 465–468.