

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 10ХГМТ ПОСЛЕ ТЕМПФОРМИНГА

А.С. Долженко, А.Н. Беляков

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

Аннотация. В работе изучено влияние температуры и степени деформации темпформинга на статические и динамические механические свойства высокопрочной стали 10ХГМТ (мас. %: Fe-0,15C-1,32Mn-1,42Cr-0,45Mo-0,42Cu-0,17Ti). Уменьшение температуры и увеличение степени деформации темпформинга приводит к увеличению прочности. После темпформинга с истинной деформацией 1,5 при 550 и 650°C предел текучести составляет 1140 и 810 МПа. После темпформинга при всех температурах наблюдается повышение ударной вязкости при понижении температуры испытания до -40°C, которое связано с расслоением образца перпендикулярно направлению удара, что предотвращает распространение трещины в направлении удара.

Ключевые слова: Высокопрочная сталь, темпформинг, предел текучести, ударная вязкость

Введение

Высокопрочные стали являются широко используемым классом конструкционных материалов [1-3]. Одним из существенных недостатков таких сталей является сравнительно высокая температура хрупко-вязкого перехода, ниже которой ударная вязкость сталей резко падает, сталь становится хрупкой, что может привести к внезапному катастрофическому разрушению конструкции. В этой связи особый интерес вызывают способы улучшения механических свойств, в первую очередь ударной вязкости при пониженных температурах, высокопрочных сталей. Для повышения ударной вязкости углеродистых сталей при низких температурах группой японских ученых (Кимура и др.) был предложен способ термомеханической обработки, названный темпформингом [4]. Темпформинг включает отпуск с последующей теплой прокаткой с большими деформациями при той же температуре и приводит к формированию ламеллярной микроструктуры с поперечным размером зерна около 100 нм и равномерным распределением дисперсных частиц. Помимо улучшения ударной вязкости, темпформинг является эффективным методом упрочнения сталей, повышая их предел текучести [4-7].

Материал и методики проведения исследования

Объектом исследования является сталь 10ХГМТ следующего химического состава: Fe-0,15C-1,32Mn-1,42Cr-0,45Mo-0,42Cu-0,17Ti, все в мас.%. В качестве деформационно-термической обработки исследуемой высокопрочной стали был выбран темпформинг: предварительно закаленные заготовки нагревались до температур 550, 600 и 650°C, выдерживались в течении 1 ч (отпуск), после чего проводилась многократная прокатка при температуре отпуска до истинных степеней деформации 0,8 и 1,5. После каждого прохода заготовки подогревались до температур отпуска. 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 $3 \times 1,5 \text{ мм}^2$, вырезанных таким образом, что направление растяжения было параллельно направлению прокатки. Испытания на ударную вязкость проводили на стандартных образцах квадратного сечения $10 \times 10 \text{ мм}^2$ и длиной 55 мм с V-образным концентратором напряжений с использованием ударной машины Instron 450 J с системой сбора данных Instron Dynatup Impulse в интервале температур от 20 до -196°C. Образцы для испытаний на удар вырезали таким образом, чтобы направление удара было параллельным нормальному направлению прокатки.

Результаты исследований и их обсуждение

Графики зависимостей напряжения от удлинения, полученные после испытаний на растяжение при комнатной температуре высокопрочной стали 10ХГМТ, подвергнутой темпформингу при различных температурах до различных степеней деформации, представлены на рисунке 1.

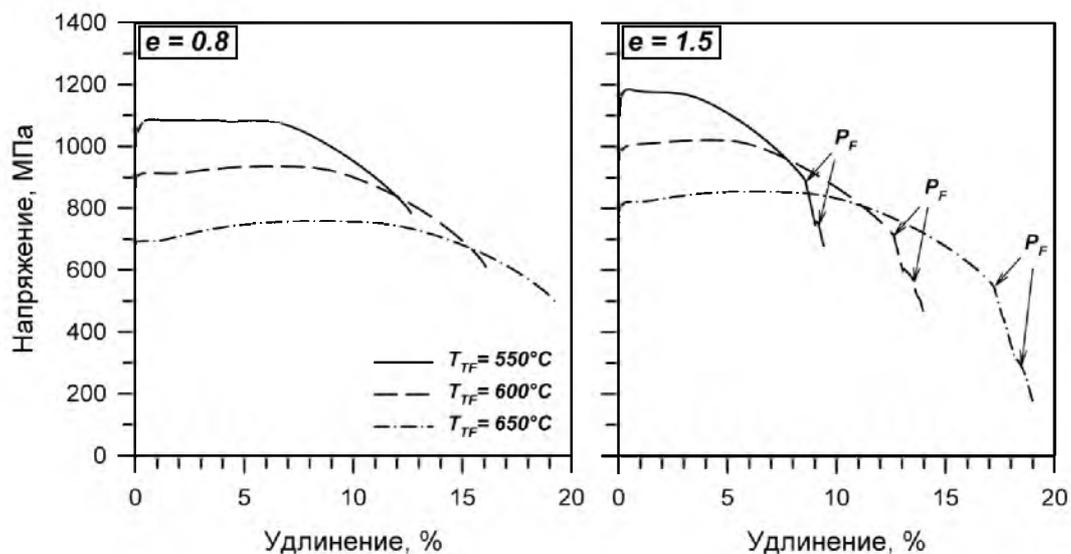


Рисунок 1. Диаграммы деформаций после испытания на растяжение высокопрочной стали 10ХГМТ, подвергнутой темпформингу при различных температурах (T_{TF}) до различных степеней деформации

После всех режимов темпформинга кривые имеют одинаковый вид до достижения предела прочности: после начала пластического течения наблюдается незначительная короткая стадия деформационного упрочнения до пикового напряжения с последующим разупрочнением до определенного уровня и продолжительная стадия равномерного удлинения с небольшим коэффициентом упрочнения. После достижения предела прочности напряжения падают, что говорит об образовании «шейки». Интересно отметить, что образцы после темпформинга при всех температурах до истинной степени деформации 1,5 демонстрируют «ступенчатое» разрушение: в первой точке P_F образуется трещина в середине образовавшейся «шейки», что сопровождается резким падением напряжения, после этого образец еще какое время деформируется то тех пор, пока не произойдет полный разрыв. Это связано со сформировавшейся во время деформационно-термической обработки вытянутой микроструктурой.

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 темпформингу при различных температурах до различных степеней деформации.

Таблица. Механические свойства высокопрочной стали 10ХГМТ после различных режимов темпформинга

| Состояние | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | δ , % |
|--|----------------------|------------------|--------------|
| $T_{TF}=550^{\circ}\text{C}$, $e=0,8$ | 1040 | 1090 | 12,6 |
| $T_{TF}=600^{\circ}\text{C}$, $e=0,8$ | 900 | 940 | 16 |
| $T_{TF}=650^{\circ}\text{C}$, $e=0,8$ | 690 | 760 | 19,4 |
| $T_{TF}=550^{\circ}\text{C}$, $e=1,5$ | 1140 | 1190 | 10,5 |
| $T_{TF}=600^{\circ}\text{C}$, $e=1,5$ | 970 | 1020 | 12,8 |
| $T_{TF}=650^{\circ}\text{C}$, $e=1,5$ | 810 | 850 | 18,3 |

Увеличение температуры темпформинга как для истинной деформации 0,8, так и для истинной деформации 1,5, приводит к снижению показателей прочности и повышению пластичности. При увеличении степени деформации при одинаковых температурах наблюдается увеличение пределов текучести и прочности, в то время как значения удлинения несколько снижаются.

На рисунке 2 представлены образцы высокопрочной стали 10ХГМТ, подвергнутой темпформингу при различных температурах до различных степеней деформации, после испытаний на ударную вязкость в широком интервале температур: от температуры жидкого азота до комнатной с указанием значений ударной вязкости KCV.

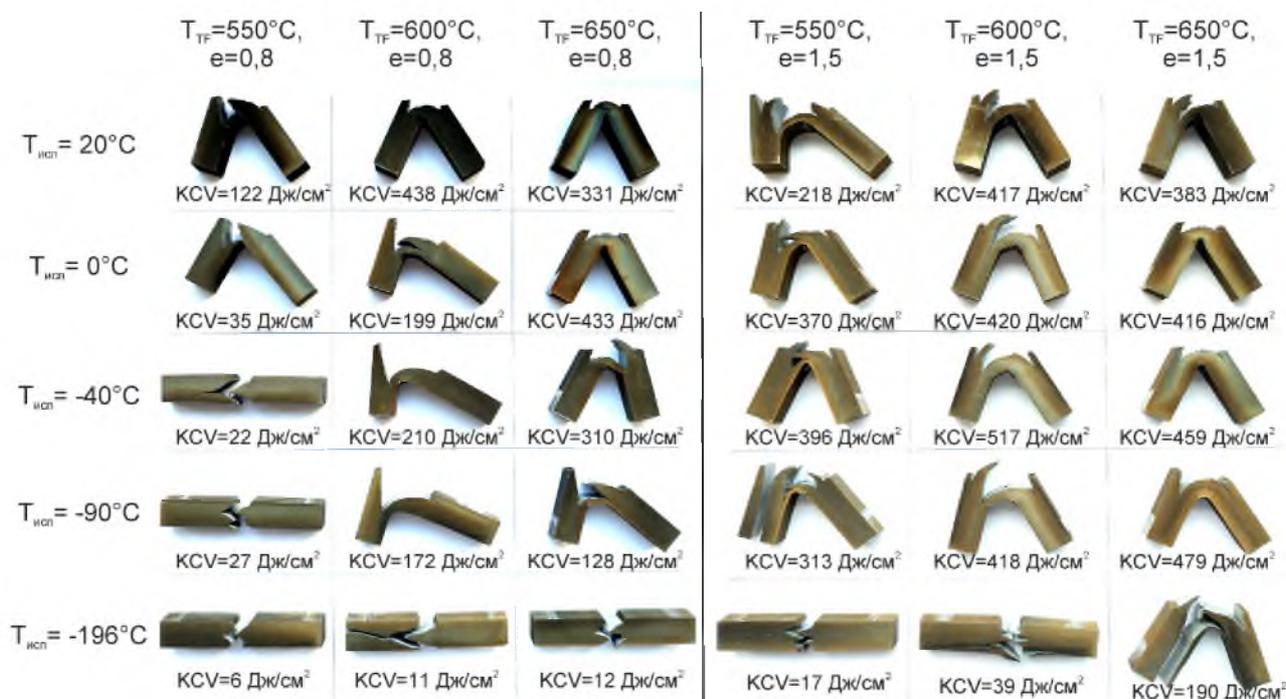


Рисунок 2. Образцы высокопрочной стали 10ХГМТ, подвергнутой темпформингу при различных режимах, после испытаний на ударную вязкость

Образцы опытной стали, подвергнутые темпформингу по всем режимам, демонстрируют 2 типа разрушения после испытаний на ударную вязкость во всем температурном интервале: расслаивание или полное разрушение посредством распространения зигзагообразной трещины (образцы $T_{TF}=550^{\circ}\text{C}$, $e=0,8$ при испытаниях на -40 и -90°C , $T_{TF}=550^{\circ}\text{C}$, $e=0,8$, $T_{TF}=600^{\circ}\text{C}$, $e=0,8$, $T_{TF}=650^{\circ}\text{C}$, $e=0,8$, $T_{TF}=550^{\circ}\text{C}$, $e=1,5$ и $T_{TF}=600^{\circ}\text{C}$, $e=1,5$ при испытании -196°C). Расслаивание сильно изогнутых образцов происходит без их полного разрушения, что свидетельствует о более высокой поглощенной энергии удара, чем регистрируется прибором, что, в свою очередь означает, что результаты KCV несколько занижены.

На рисунке 3 представлен график зависимости значений KCV от температур испытания образцов высокопрочной стали 10ХГМТ после различных режимов темпформинга.

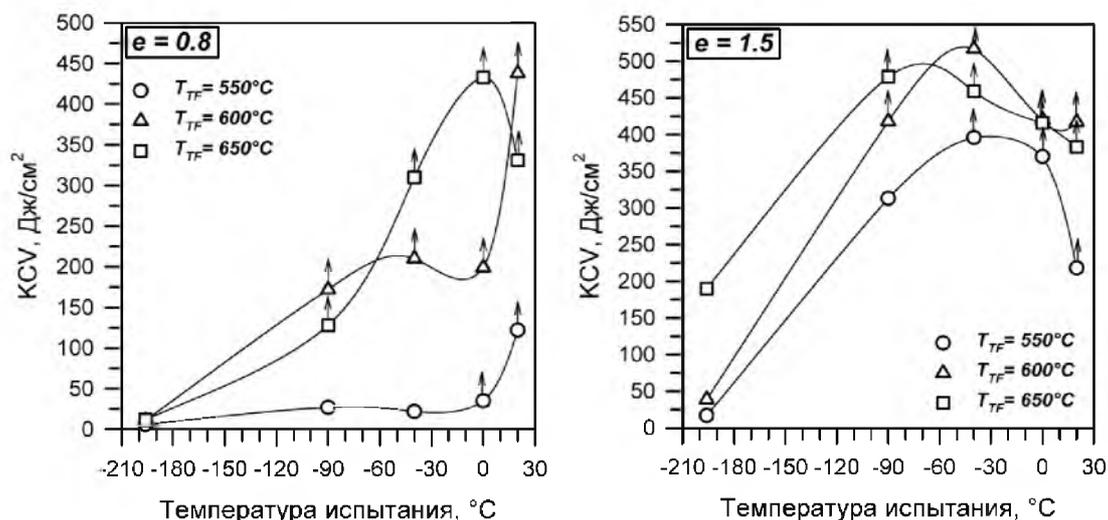


Рисунок 3. Зависимость значений KCV от температур испытания образцов стали 10ХГМТ после различных режимов темпформинга

Из графиков видно, для образцов высокопрочной стали 10ХГМТ, подвергнутых темпформингу, характерно повышение значений ударной вязкости KCV с увеличением температуры темпформинга. Для образцов высокопрочной стали 10ХГМТ, подвергнутых темпформингу до истинной степени деформации 1,5 наблюдается повышение значений ударной вязкости при понижении температуры испытания до $-40 \sim -90^{\circ}\text{C}$. Темпформинг опытной стали при температурах 600 и 650°C до истинной деформации 1,5 приводит к существенному повышению значений ударной вязкости. Например, образец после темпформинга при 650°C до $e=1,5$ обладает значением $KCV_{-90^{\circ}\text{C}} \geq 489$ Дж/см². Стоит отметить, что даже при температуре -

196°С образец стали 10ХГМТ, подвергнутый темпформингу при 650° до истинной деформации 1,5 не теряет способности к раслаиванию и сохраняет значение ударной вязкости KCV выше 190 Дж/см², в отличие от образцов, подвергнутых темпформингу до истинной деформации 0,8, когда образцы разрушаются посредством распространения зигзагообразной трещины, а их значение KCV не превышает 12 Дж/см².

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

Литература

1. Krauss, G. Steels: Processing Structure and Performance; ASM International: Phoenix, AZ, USA, 2015; p. 681.
2. DeArdo, A.J.; Hua, M.J.; Cho, K.G.; Garcia, C.I. On strength of microalloyed steels: An interpretive review. Mater. Sci. Technol. **2009**, 25, 1074–1082.
3. Cochrane, R.C. Phase transformations in microalloyed high strength low alloy (HSLA) steels. In Phase Transformations in Steels, Vol.2: Diffusionless Transformations, High Strength Steels, Modelling and Advanced Analytical Techniques; Pereloma, E., Edmonds, D.V., Eds.; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2012; pp. 153–212.
4. Kimura, Y.; Inoue, T.; Yin, F.; Tsuzaki, K. Inverse temperature dependence of toughness in an ultrafine grain-structure steel. Science **2008**, 320, 1057–1060.
5. Dolzhenko, A.; Kaibyshev, R.; Belyakov, A. Tempforming as an advanced processing method for carbon steels. Metals **2020**, 10, 1566.
6. Dolzhenko, A.; Yanushkevich, Z.; Nikulin, S.A.; Belyakov, A.; Kaibyshev, R. Impact toughness of an S700MC-type steel: Tempforming vs ausforming. Mater. Sci. Eng. A **2018**, 723, 259–268.