

УДК 539.385

А. С. Долженко*, Ж. Ч. Янушкевич, А. Н. Беляков

Национальный исследовательский университет «Белгородский государственный университет», г. Белгород

**lugovskaya.anastasiya94@gmail.com*

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук *А. Н. Беляков*

ВЛИЯНИЕ ТЕМПФОРМИНГА НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ТИПА S700MC

Исследовано влияние темпформинга на микроструктуру и механические свойства высокопрочной низкоуглеродистой стали типа S700MC. Темпформинг способствует формированию ультрамелкозернистой структуры с образованием дисперсных карбидов. Деформационно-термическая обработка способствует значительному увеличению прочностных характеристик исследуемой стали, а также значений ударной вязкости в интервале температур от – 196 до 20 °С.

Ключевые слова: высокопрочная низкоуглеродистая сталь, темпформинг, ультрамелкозернистая структура.

A. S. Dolzhenko, Zh. Ch. Yanushkevich, A. N. Belyakov

INFLUENCE OF TEMPFORMING ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES IN LOW-CARBON S700MC-TYPE STEEL

The effect of the tempforming on the microstructure and mechanical properties of high-strength low-carbon S700MC steel was studied. The tempforming resulted in the development of ultra-fine grained microstructure. The tempered microstructures were characterized by the formation of dispersed carbides. The thermomechanical treatment led to significant increase in tensile strength and impact toughness at test temperature from – 196 to 20°C.

Keywords: high-strength low-carbon steel, tempforming, ultra-fine grained microstructure.

Высокопрочные низколегированные стали являются широко используемыми материалами в большинстве отраслей промышленности из-за их низкой стоимости и хорошего сочетания прочности, пластичности и вязкости [1]. Однако эти высокопрочные стали обычно характеризуются недостаточной энергией удара: от 10 до 40 Дж при комнатной температуре [1–3]. Такая низкая вязкость часто ограничивает их структурные применения. Для конструкционных сталей, которые должны быть как прочными, так и вязкими (устойчивыми к разрушению), они не должны

использоваться при температурах ниже температуры хрупко-вязкого перехода (ХВП), при которой сталь теряет свою вязкость и трещины распространяются хрупко. Основным методом снижения температуры ХВП является уменьшение размера зерна [4–8]. Ультрамелкозернистая структура уменьшает концентрацию напряжений на границах зерен, особенно на тройных стыках [7]. Однако упрочнение путем измельчения зерна до 1 мкм или менее приводит к резкому снижению пластичности и низкой вязкости при комнатной температуре. Японские ученые предложили интересный подход к повышению вязкости и понижению температуры ХВП высокопрочной низколегированной стали [9]. Он состоит в формировании слоистой структуры с поперечным размером зерна около 100 нм и равномерным распределением дисперсных наноразмерных частиц вторичных фаз. Эта термомеханическая обработка называется темпформинг. Таким образом, целью настоящей работы является изучение микроструктуры и механических свойств высокопрочной низколегированной стали, подвергнутой темпформингу (для сравнения была выбрана вторая термообработка – аусформинг).

В качестве объекта исследований была выбрана высокопрочная низкоуглеродистая сталь типа S700MC ($\text{Fe}-0,09\text{C}-0,12\text{Si}-1,19\text{Cr}-1,55\text{Mn}-0,003\text{P}-0,005\text{S}-0,05\text{Nb}-0,025\text{Al}-0,05\text{Ti}-0,42\text{Mo}-0,09\text{V}-0,003\text{V}$). Стальной слиток был подвергнут гомогенизационному отжигу при температуре 1150 °С в течение часа и ковке при температуре отжига с последующим охлаждением на воздухе. Полученная заготовка была подвергнута закалке при температуре 1100 °С с охлаждением в масле (исходная термообработка (рис. 1, а)), после чего была получена мелкозернистая ферритная структура со средним размером зерна 5 мкм. В качестве деформационно-термической обработки были выбраны два способа. Первый способ – аусформинг, суть которого состоит в прокатке с понижением температуры от 1000 °С до 850 °С до истинной степени деформации $\varepsilon \sim 0,9$. Второй способ включал закалку с 1100 °С, отпуск при 650 °С в течение часа и прокатку при температуре отпуска (темпформинг) до истинной степени деформации $\varepsilon \sim 1,5$.

Аусформинг приводит к формированию структуры реечного мартенсита (рис. 1, б). Величина исходного аустенитного зерна 18–20 мкм. Зерна, в свою очередь, состоят из пакетов, разделенных на блоки размером 1,5 мкм. Микроструктура высокопрочной низкоуглеродистой стали, сформировавшаяся в процессе темпформинга (рис. 1, в), состоит из вытянутых вдоль направления прокатки зерен. Темпформинг приводит к существенному измельчению микроструктуры – средний поперечный размер зерен составляет 530 нм. Следует отметить, что темпформинг также приводит к образованию текстур волокон в направлениях $\langle 111 \rangle$ и $\langle 001 \rangle$, параллельных ND.

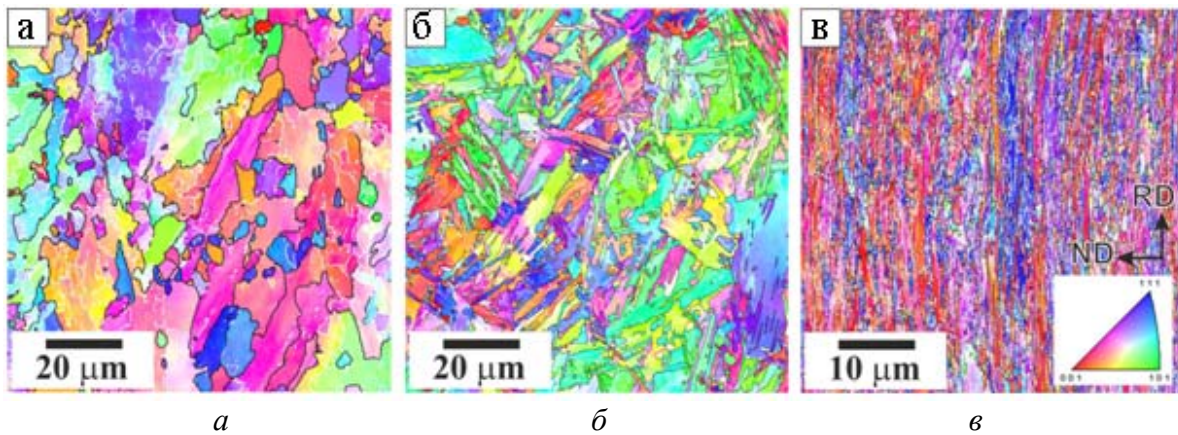


Рис. 1. Микроструктуры высокопрочной низкоуглеродистой стали типа S700MC после: *a* – исходной ТО, *б* – аусформинга, *в* – темпформинга

Деформационно-термическая обработка в обоих случаях приводит к существенному повышению прочностных характеристик исследуемой стали по сравнению с исходной обработкой. Аусформинг (AF) приводит к повышению предела текучести с 570 до 910 МПа и предела прочности с 795 до 980 МПа, а также к незначительному снижению пластичности с 17 до 13 %. Однако более эффективным способом повышения прочностных характеристик высокопрочной низкоуглеродистой стали типа S700MC является темпформинг (TF). Предел прочности и предел текучести достигают 1110 и 1090 МПа (рис. 2, *a*). Повышение прочностных характеристик после темпформинга связано с формированием мелкозернистой слоистой микроструктуры.

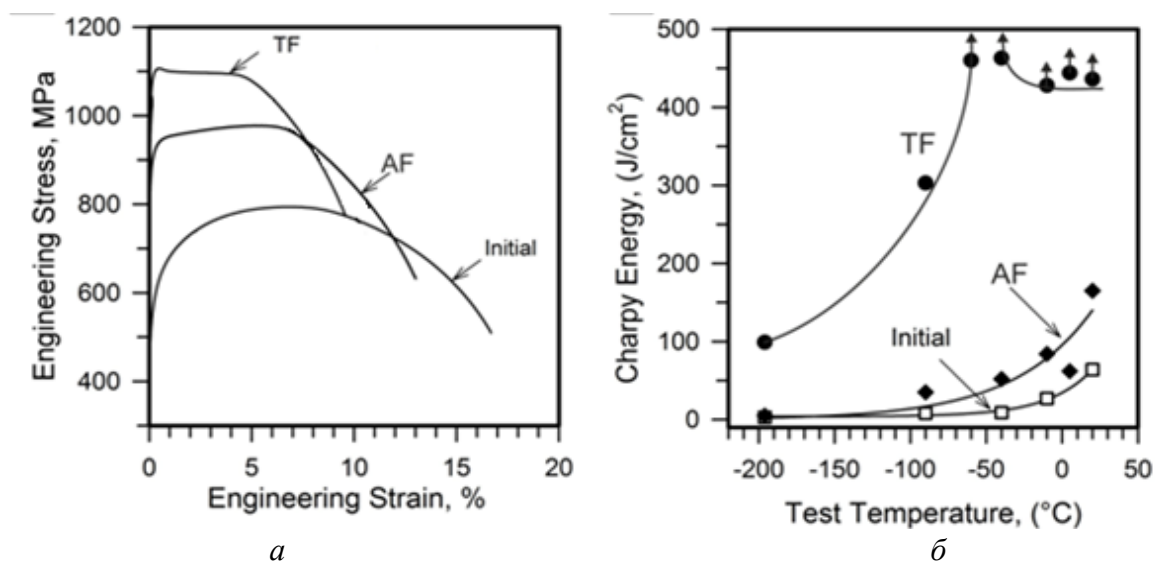


Рис. 2. Кривые растяжения при комнатной температуре (*a*) и ударная вязкость при различных температурах (*б*) стали типа S700MC, подвергнутых различной обработке. Стрелки говорят о том, что образец не разрушился

Исследования ударной вязкости стали типа S700MC показали, что деформационно-термическая обработка позволяет значительно повысить значения ударной вязкости как при комнатной, так и при отрицательных температурах (рис. 2, б). После аусформинга значения ударной вязкости при комнатной температуре выросли с 51 Дж/см² до 165 Дж/см² по сравнению с исходным состоянием. Ударная вязкость исследуемой стали, подвергнутой темпформингу, достигает максимального значения при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($KCV_{-40^{\circ}\text{C}} > 463\text{ Дж/см}^2$) с последующим снижением ударной вязкости при уменьшении температуры испытаний. Значение ударной вязкости при температуре жидкого азота $KCV_{-196^{\circ}\text{C}} = 99\text{ Дж/см}^2$. При температурах от 20 до $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается расслаивание структуры, которое происходит почти параллельно продольному направлению прокатки. При температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается зигзагообразное распространение трещины.

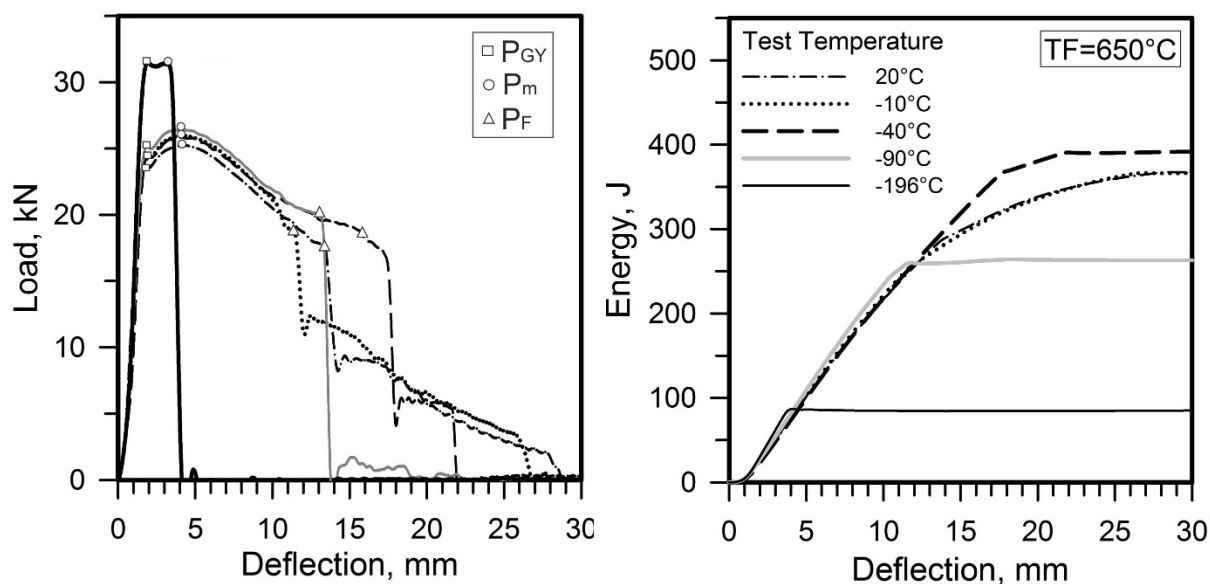


Рис. 3. Графики кривых нагрузка–прогиб и поглощенная энергия–прогиб стали типа S700MC, подвергнутой темпформингу

Анализ кривых нагрузка-прогиб низколегированной стали типа S700MC (рис. 3) показывает, что разрушение происходит с большим поглощением энергии. При испытаниях на удар при температурах от -40 до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ полная поглощенная энергия составляет ~ 400 Дж. Нагрузка, при которой наблюдается общее начало текучести (P_{GY}) достигается при прогибе от 1,7 до 2,2 мм в исследуемом диапазоне температур испытания. Четко определенная точка P_F , указывающая на нестабильное распространение трещины, появляется при температурах от -90 до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. При температурах испытаний от -90 до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ после достижения точки P_F

дальнейшее скачкообразное уменьшение нагрузки может быть связано с постепенным распространением трещины.

Таким образом, деформационно-термическая обработка является эффективным способом улучшения механических свойств стали. Темпформинг стали типа S700MC приводит к формированию мелкозернистой структуры со средним поперечным размером зерна 530 нм. Предел прочности исследуемой стали, подвергнутой темпформингу, увеличивается с 795 до 1110 МПа. После темпформинга сталь демонстрирует высокую ударную вязкость, максимальное значение которой при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ более 463 Дж/см^2 , с последующим снижением значений KCV до 99 Дж/см^2 при понижении температуры испытания до температуры жидкого азота. Разрушение происходит с большим поглощением энергии и сопровождается скачкообразным уменьшением нагрузки, которое может быть связано с постепенным распространением трещин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Philip T. V. ASM International / T. V. Philip, T. J. McCaffrey // *Metals Handbook*. 1990. V. 1. P. 430–448.
2. Tomita Y. Development of fracture toughness of ultrahigh strength, medium carbon, low alloy steels for aerospace applications / Y. Tomita // *Int. Mater. Rev.* 2000. V. 45. P. 27–37.
3. Tomita Y. Low-Temperature improvement of mechanical properties of aisi 4340 steel through high-temperature thermomechanical treatment / Y. Tomita // *Metall. Trans.* 1991. V. 22A. P. 1093–1102.
4. The nature and consequences of coherent transformations in steel // J. W. Morris, Jr., C. S. Lee, Z. Guo // *ISIJ Int.* 2003. V. 43. P. 410–419.
5. Takaki S. Mechanical properties of ultra fine grained steels / S. Takaki, K. Kawasaki, Y. J. Kimura // *J. Mater. Process. Technol.* 2001. V. 117. P. 359–363.
6. Toughness of ultrafine grained ferritic steels fabricated by ARB and annealing process / N. Tsuji, S. [et al.] // *Mater. Trans.* 2004. V. 4. P. 227–228.
7. Raabe D. Mechanical properties of an ultrafine grained C–Mn steel processed by warm deformation and annealing / R. Song, D. Ponge, D. Raabe // *Acta Mater.* 2005. V. 54. P. 4881–4892.
8. Valiev R. Z. Enhanced low-temperature impact toughness of nanostructured Ti / V. V. Stolyarov, R. Z. Valiev, Y. T. Zhu // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 88.
9. Inverse temperature dependence of toughness in an ultrafine grain-structure steel / K. Tsuzaki [et al.] // *Science*. 2008. V. 320. P. 1057–1060.