

Анна Николаевна Морозова^{1*}

¹ФГБУН Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

**amorozova@imp.uran.ru*

ЭВОЛЮЦИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ ПРИ ОТПУСКЕ МАРТЕНСИТА

Изучено влияние структурных и деформационных параметров на величину эффекта деформационного старения в малоуглеродистой стали 08Г2Б после различных термообработок. Показано, что наличие на кривых растяжения зуба и площадки текучести различной формы и размеров свидетельствует о протекании в них в различном масштабе деформационного старения. Объяснены причины такого проявления ЭДС в изученной стали. Установлены наиболее чувствительные к деформационному старению параметры.

Ключевые слова: высокопрочные низколегированные стали, деформационное старение, прочность, вязкость.

Anna N. Morozova

EVOLUTION OF STRAIN AGING DURING TEMPERING OF MARTENSITE

The influence of structural and deformation parameters on the magnitude of the effect of strain aging in low-carbon steel 08G2B after various heat treatments is studied. It is shown that the presence of a tooth and a yield plateau of various shapes and sizes on the tensile curves indicates that strain aging occurs in them on a different scale. The reasons for the different manifestation of EMF in steel are explained. The most sensitive parameters to strain aging are established.

Key words: high-strength low-alloy steels, strain aging, strength, viscosity.

Интенсивные исследования эффекта деформационного старения (ЭДС) сплавов на различной основе, проводимые в последние годы, можно связать с его влиянием на функциональные свойства и качество поверхности изделий [1-4]. Для конструкционных материалов определение величины эффекта деформационного старения имеет большой научно-практический интерес, поскольку вызванная деформационным старением деградация механических свойств конструкции может привести к ее преждевременному разрушению.

В данной работе исследуется влияние структурных и деформационных параметров на величину эффекта деформационного старения в малоуглеродистой стали.

Материалом исследования являлась низкоуглеродистая микролегированная сталь 08Г2Б, следующего химического состава (масс. %): 0,08 С, 1,85 Мн, 0,13 Мо, 0,02 Ti, 0,02 V, 0,05 Nb, 0,17 Cu, 0,4 Si, 0,19 Cr, 0,22

Ni, 0,001 S, 0,013 P. Образцы вырезались из штрипса, изготовленного по схеме контролируемой прокатки.

С целью создания различной величины ЭДС (D) образцы подвергались термообработке по режимам:

- нагрев на $T_n = 250$ °С, $\tau_n = 30$ мин., охлаждение на воздухе ($D = 5$);
- нагрев на $T_n = 680$ °С, $\tau_n = 30$ мин., охлаждение на воздухе ($D = 4$);
- нагрев на $T_n = 680$ °С, $\tau_n = 30$ мин., охлаждение в воде ($D = 2$);
- нагрев на $T_n = 250$ °С, без выдержки, охлаждение на воздухе ($D = 1$);

Испытания на растяжение со скоростью $\dot{\epsilon} = 2.7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ плоских образцов толщиной 3, шириной 20 и длиной рабочей части 60 мм проводились на машине Instron 8801, снабженной оптическим комплексом Strain Master для анализа полей перемещений и деформаций методом корреляции цифровых изображений (КЦИ).

Кривые растяжения $\sigma - \delta$ образцов после обработок по изученным режимам имеют зуб и площадку текучести различной формы и размеров, что свидетельствует о протекании в них в различном масштабе эффекта деформационного старения. Также у образцов значительно различаются прочностные (предел текучести σ_T , временное сопротивление σ_B) и пластические (протяженность площадки текучести δ_T , линейной δ_L , степенной δ_S и равномерной δ_R стадии деформации) свойства.

Термообработка по выбранным режимам воздействует на механические свойства (D) через выделение дисперсных ($d_c \approx 100 \text{ \AA}$) частиц вторых фаз: карбида Fe и/или атмосфер атомов углерода при $T_n = 250$ °С, $\tau_n = 30$ мин., а также специальных карбидов типа MeC ($T_n = 680$ °С, $\tau_n = 30$ мин. [5]). Заметное влияние на D оказывает также скорость охлаждения образцов после высокотемпературного нагрева: закалка в воде ($D = 2$) способствует ускоренному прохождению «токсичной» области температур вблизи 250 °С, тогда как охлаждение на воздухе повышает D до 4, что свидетельствует о наибольшем вкладе в D карбидов Fe и атмосфер атомов углерода. Наименьшую величину $D = 1$ дает нагрев образца на 680 °С без выдержки, с последующим охлаждением в воде, при котором не успевает выделиться частицы MeC. Количество дисперсных частиц карбидов обоого типа в структуре невелико, значительная часть атомов углерода находится в твердом растворе, где сильные карбидообразователи подавляют их диффузионную подвижность [5].

С увеличением D протяженность площадки текучести падает (рис.). Аналогично изменяются и другие параметры пластичности δ_L , δ_{ST} , δ_R , а также δ , что позволяет связать с действием на все компоненты пластичности одного доминирующего фактора – выделения дисперсионных карбидных частиц, препятствующих движению дислокаций, реализующих пластическое течение.

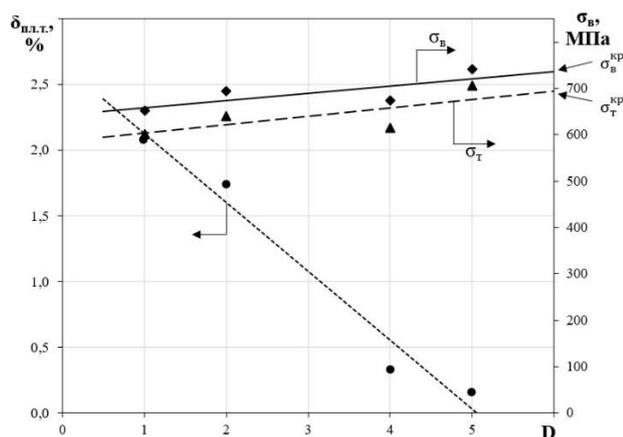


Рис. Соотношение между $\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{\text{т}}$, $\delta_{\text{пл.т.}}$ и величиной ЭДС – D.

При дисперсионном твердении одновременно с понижением пластичности возрастает прочность ($\sigma_{\text{т}}$, $\sigma_{\text{в}}$), так что наиболее мягкие образцы ($D = 1$, $D = 2$) имеют самую протяженную площадку текучести. Именно на таких образцах железа низкоуглеродистых сталей, закаленных от температур несколько ниже $A_{\text{с1}}$ и состаренных в «токсичном» интервале температур, был открыт и наиболее ярко проявляется ЭДС [6].

Показано, что среди выделенных механических характеристик на кривых растяжения образцов сталей для оценки величины ЭДС, можно использовать протяженность равномерной стадии деформации, как наиболее чувствительный к деформационному старению параметр.

Работа выполнена в ИФМ УрО РАН рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Структура», № 122021000033-2). Испытания проведены на оборудовании центра коллективного пользования «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rana R. Automotive Steels – Design, Metallurgy, Processing and Applications / R. Rana, S.B. Singh. Elsevier, 2017. 470 p.
2. Waterschoot T. Static strain aging phenomena in cold-rolled dual-phase steels / T. Waterschoot [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A. 2003. №34(13). P. 781–791. <https://doi.org/10.1007/s11661-003-1006-z>.
3. Smirnov M. A. Strain aging and the Bauschinger effect in low-carbon pipe steel / M. A. Smirnov [et al.] // Steel Transl. 2016. №46. P. 58–64. <https://doi.org/10.3103/S0967091216010149>
4. Danilov V.I. Investigation of Lüders deformation in the mild steel / V.I. Danilov [et al.] // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2017. №60(10). P. 831-838. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-10-831-838>.
5. Гольдштейн М.И. Дисперсионное упрочнение стали / М.И. Гольдштейн, В.М. Фарбер. М.: Metallurgy, 1979. 208 с.
6. Мак Лин Д. Механические свойства металлов / Д. Мак Лин. М.: Metallurgy, 1965. 431 с.

REFERENCES

1. Rana R. Automotive Steels – Design, Metallurgy, Processing and Applications / R. Rana, S.B. Singh. Elsevier, 2017. 470 p.
2. Waterschoot T. Static strain aging phenomena in cold-rolled dual-phase steels / T. Waterschoot [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A. 2003. №34(13). P. 781–791. doi:10.1007/s11661-003-1006-z.
3. Smirnov M. A. Strain aging and the Bauschinger effect in low-carbon pipe steel / M. A. Smirnov [et al.] // Steel Transl. 2016. №46. P. 58–64. <https://doi.org/10.3103/S0967091216010149>
4. Danilov V.I. Investigation of Lüders deformation in the mild steel / V.I. Danilov [et al.] // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2017. №60(10). P. 831-838. DOI: 10.17073/0368-0797-2017-10-831-838.
5. Goldstein M.I. Dispersion hardening of steel / M.I. Goldstein, V.M. Farber. Moscow: Metallurgy, 1979. 208 p.
6. Mac Lean D. Mechanical properties of metals / D. Mac Lean. Moscow: Metallurgy, 1965. 431 p.