

Игорь Юрьевич Литовченко^{1,2*}, Сергей Александрович Аккузин¹, Надежда Александровна Полехина¹, Ксения Викторовна Спиридонова¹, Валерия Васильевна Осипова^{1,2}, Анна Владимировна Ким^{1,2}, Вячеслав Михайлович Чернов³

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

²Национальный Исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

³АО «ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара», г. Москва, Россия

*litovchenko@ispms.ru

МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ АУСТЕНИТНЫЕ СТАЛИ

Разработаны новые малоактивируемые аустенитные стали с повышенным содержанием марганца и сильных карбидообразующих элементов. Обобщены результаты экспериментальных исследований особенностей микроструктуры, механических свойств и термической стабильности этих сталей в структурных состояниях после закалки и холодной деформации. Показана стабильность зеренной и микродвойниковой структуры в условиях длительного (до 500 ч) старения при 700 °С. Основным процессом, который реализуется в этих условиях, является выделение дисперсных частиц карбидов $M_{23}C_6$ (М – Cr, Mn, Fe). Эти частицы, выделившиеся по границам зерен и микродвойников, обеспечивают сохранение хорошего уровня механических свойств сталей в условиях длительного старения.

Ключевые слова: малоактивируемые аустенитные стали, дефектная микроструктура, дисперсные частицы, прочность, пластичность, термическая стабильность.

Igor Yu. Litovchenko, Sergey A. Akkuzin, Nadezhda A. Polekhina, Kseniya V. Spiridonova, Valeria V. Osipova, Anna V. Kim, Vyacheslav M. Chernov

LOW-ACTIVATION AUSTENITIC STEELS

New low-activation austenitic steels with increased content of manganese and strong carbide-forming elements have been developed. The results of experimental studies of microstructure features, mechanical properties and thermal stability of these steels in structural states after quenching and cold rolling are summarised. The stability of the grain and microtwin structure under long-term (up to 500 h) aging at 700 °C is shown. The main process, which occurs under these conditions, is the precipitation of dispersed particles of $M_{23}C_6$ carbides (M – Cr, Mn, Fe). These particles, precipitated along grain and microtwin boundaries, ensure that the steels retain a good level of mechanical properties under long-term aging.

Key words: low-activation austenitic steels, deformed microstructure, dispersed particles, strength, ductility, thermal stability.

Малоактивируемые аустенитные стали на Cr-Mn основе были предложены [1] в качестве замены сильноактивируемым Cr-Ni сталям, используемым в настоящее время в качестве основных конструкционных материалов. Однако стабильность аустенита хромомарганцевых сталей, разработанных ранее оказалась ниже по сравнению с хромоникелевыми сталями [1].

В настоящей работе представлено обобщение оригинальных результатов авторов по разработке и исследованию новых малоактивируемых аустенитных сталей [2-6] с повышенной стабильностью аустенита. Это достигнуто за счет содержания Mn (26 – 29 вес. %) при содержании C (0,23 – 0,32 вес. %). Для обеспечения повышенной эффективности дисперсного упрочнения, в новых сталях было увеличено содержание сильных карбидообразующих элементов (Ti, Ta, V, Zr).

Методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии исследованы особенности микроструктуры, элементного и фазового состава новых сталей Fe-29Mn-12Cr-W-Si-Ta-Ti-V-Zr-0,25C, Fe-26Mn-11Cr-W-Si-Ta-Ti-V-Zr-0,32C и Fe-11Cr-27Mn-W-Ti-V-Ta-Y-0,23C в структурных состояниях после закалки и холодной деформации (ХД) прокаткой на 20% [2-4]. Показано, что в закаленном состоянии для сталей характерны плоские дислокационные скопления и микродвойники. В условиях ХД в сталях реализуется интенсивное механическое двойникование, формируется повышенная плотность дислокационных субструктур, что связано с достаточно низкой энергией дефектов упаковки (≈ 25 мДж/м²). В этих состояниях в сталях обнаружены дисперсные частицы MC (M – Ti, Ta, V, Zr, Si, W) и (в малых долях) M₂₃C₆ (M – Cr, Mn, Fe).

Показано [3], что прочностные свойства стали Fe-26Mn-11Cr-W-Si-Ta-Ti-V-Zr-0.32C в интервале температур (20 – 750 °C) сопоставимы, либо превышают соответствующие свойства аналогов и сильноактивируемой хромоникелевой стали. Это обеспечивается совместным влиянием субструктурного, дисперсного и твердорастворного упрочнения. Разработанная сталь имеет более высокие (до 3-х раз) значения удлинения до разрушения, по сравнению с аналогами, главным образом за счет пластичности, наведенной двойникованием. В условиях растяжения в температурном интервале 20 – 750 °C наблюдается преимущественно вязкий транскристаллитный излом. Дисперсные частицы карбидов типа MC и M₂₃C₆, располагающиеся на границах зерен, способствуют появлению отдельных участков интеркристаллитного разрушения при комнатной температуре растяжения.

Зеренная и двойниковая микроструктура сталей Fe-29Mn-12Cr-W-Si-Ta-Ti-V-Zr-0,25C и Fe-26Mn-11Cr-W-Si-Ta-Ti-V-Zr-0.32C в условиях старения в течение 100 и 500 ч при 700 °C остается стабильной. Основным процессом, который наблюдается в этих условиях является выделение

дисперсных карбидных частиц $M_{23}C_6$ [5, 6]. При старении закаленного состояния эти карбиды выделяются по границам и внутри зерен, а также в виде оболочек на частицах карбидов MC. При старении ХД состояния карбиды $M_{23}C_6$ выделяются на некогерентных и когерентных границах двойников. Их поперечные размеры ограничены толщиной двойников.

Старение стали Fe-26Mn-11Cr-W-Si-Ta-Ti-V-Zr-0,32C в ХД состоянии приводит к формированию некоторого количества ε -мартенсита (до 15 %). Показано, что эта фаза полностью превращается в аустенит при нагреве выше 500 °С и заново выделяется при охлаждении до комнатной температуры. Старение ХД состояния длительностью 500 ч способствует выделению хрупкой и твердой σ -фазы в стали Fe-26Mn-11Cr-W-Si-Ta-Ti-V-Zr-0,32C. После старения закаленного состояния эта фаза не обнаружена.

Выделение частиц $M_{23}C_6$ влияет на прочностные и пластические свойства сталей Fe-26Mn-11Cr-W-Si-Ta-Ti-V-Zr-0,32C и Fe-11Cr-27Mn-W-Ti-V-Ta-Y-0,23C. После старения закаленного состояния наблюдается сохранение, или даже некоторое повышение прочностных свойств сталей по сравнению с исходным состоянием. Это связано с превалированием эффектов дисперсного упрочнения частицами $M_{23}C_6$ над эффектами разупрочнения за счет возврата дефектной структуры. Старение ХД состояния приводит к снижению прочностных свойств. Это связано с выделением частиц $M_{23}C_6$ преимущественно по границам двойников и ускоренным отпуском холоднодеформированной структуры. Удлинение до разрушения в результате старения снижается в обоих состояниях.

Основным механизмом разрушения состаренных при 700 °С образцов сталей при всех исследованных температурах испытаний на растяжение является вязкое транскристаллитное разрушение. Частицы карбидов $M_{23}C_6$, выделившиеся по границам зерен в результате старения закаленного состояния, приводят к появлению областей интеркристаллитного разрушения. Наличие высокой плотности тонких пластин $M_{23}C_6$ по границам микро- и нанодвойников после старения ХД состояния способствует более однородному упрочнению стали и приводит к исчезновению признаков межкристаллитного разрушения. Наличие σ -фазы после старения продолжительностью 500 ч ХД состояния стали Fe-26Mn-11Cr-W-Si-Ta-Ti-V-Zr-0,32C приводит к снижению до 7 % удлинения до разрушения и появлению хрупкой составляющей в изломах при комнатной температуре. При повышении температуры испытаний влияние σ -фазы на величину пластичности и наличие хрупкой составляющей в изломах снижается.

Средние размеры дисперсных частиц (MC и $M_{23}C_6$) и их объемная доля в стали Fe-11Cr-27Mn-W-Ti-V-Ta-Y-0,23C меньше, по сравнению со сталью Fe-26Mn-11Cr-W-Si-Ta-Ti-V-Zr-0,32C. Это достигнуто за счет уменьшения содержания углерода (0,23 вместо 0,32 вес. %) и сильных карбидообразующих элементов (Ti, Ta), а также отсутствия Zr. Меньшие размеры зерен в этой стали могут быть связаны с сегрегацией Y по границам зерен. Уменьшения плотности и объемной доли частиц $M_{23}C_6$ в условиях старения Y-модифицированной стали, по сравнению со сталью Fe-26Mn-11Cr-W-Si-Ta-

Ti–V–Zr–0,32C, не обнаружено. После старения ХД состояния продолжительностью 500 ч обнаружены следы σ -фазы, при этом ее содержание значительно меньше, чем в стали Fe–26Mn–11Cr–W–Si–Ta–Ti–V–Zr–0,32C.

Разработанные новые малоактивируемые аустенитные стали обладают высокими прочностными и пластическими свойствами и стабильностью микроструктуры и механических свойств в условиях длительного (до 500 ч) старения при 700 °С. Это достигается за счет сохранения зеренной и микродвойниковой структуры. Частицы $M_{23}C_6$ закрепляют границы зерен и микродвойников в условиях старения. Тенденция к выделению этих карбидов способствует обеднению твердого раствора аустенита по хрому. При продолжительных временах старения холоднодеформированного состояния обнаружена тенденция к выделению σ -фазы. Для обеспечения возможности применения разработанных малоактивируемых аустенитных сталей в качестве конструкционных материалов необходима дополнительная корректировка их элементного состава и режимов термомеханических обработок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00802, <https://rscf.ru/project/22-19-00802/>.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ivanov L.I. Radiation physics of metals and its applications / L.I. Ivanov, Y.M. Platov. Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2004. 369 p.
2. Litovchenko I.Yu. The Microstructure and Tensile Properties of New High-Manganese Low-Activation Austenitic Steel / I.Yu. Litovchenko [et al.] // Metals. 2022. V. 12. Art. 2106. <https://doi.org/10.3390/met12122106>.
3. Litovchenko I. Microstructure Features and Mechanical Properties of Modified Low-Activation Austenitic Steel in the Temperature Range of 20 to 750° C / I.Yu. Litovchenko [et al.] // Metals. 2023. V. 13, №. 12. P. 2015. <https://doi.org/10.3390/met13122015>
4. Litovchenko I.Y. Microstructure and mechanical properties of Y-modified low-activation austenitic steel // Letters on Materials. 2024. V. 12, № 4. P. 346–352. <https://doi.org/10.48612/letters/2024-4-346-352>
5. Litovchenko I.Yu. Effect of aging at 700 °C on the microstructure, phase transformations, and mechanical properties of low-activation austenitic steel / I.Yu. Litovchenko [et al.] // Materialia. 2025. Vol. 39, 102335. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2025.102335>
6. Litovchenko I.Yu., Akkuzin S.A., Polekhina N.A., Spiridonova K. V., Osipova V.V., Kim A.V., Chernov V.M. Microstructure and mechanical properties of Y-modified low-activation austenitic steel after aging // Russian Physics Journal. 2025. <https://doi.org/10.1007/s11182-024-03343-6>

REFERENCES

1. Ivanov L.I. Radiation physics of metals and its applications / L.I. Ivanov, Y.M. Platov. Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2004. 369 p.

2. Litovchenko I.Yu. The Microstructure and Tensile Properties of New High-Manganese Low-Activation Austenitic Steel / I.Yu. Litovchenko [et al.] // *Metals*. 2022. V. 12. Art. 2106. <https://doi.org/10.3390/met12122106>.
3. Litovchenko I. Microstructure Features and Mechanical Properties of Modified Low-Activation Austenitic Steel in the Temperature Range of 20 to 750° C / I.Yu. Litovchenko [et al.] // *Metals*. 2023. V. 13, №. 12. P. 2015. <https://doi.org/10.3390/met13122015>
4. Litovchenko I.Y. Microstructure and mechanical properties of Y-modified low-activation austenitic steel / I.Yu. Litovchenko [et al.] // *Letters on Materials*. 2024. V. 12, № 4. P. 346–352. <https://doi.org/10.48612/letters/2024-4-346-352>
5. Litovchenko I.Yu. Effect of aging at 700 °C on the microstructure, phase transformations, and mechanical properties of low-activation austenitic steel / I.Yu. Litovchenko [et al.] // *Materialia*. 2025. Vol. 39, 102335. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2025.102335>
6. Litovchenko I.Yu., Akkuzin S.A., Polekhina N.A., Spiridonova K. V., Osipova V.V., Kim A.V., Chernov V.M. Microstructure and mechanical properties of Y-modified low-activation austenitic steel after aging // *Russian Physics Journal*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s11182-024-03343-6>