

**ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СТАРЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И
ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ**А.С. Михно¹, М.Ю. Панченко², И.А. Тумбусова¹

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. Е.Г. Астафурова

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

E-mail: nastia.mihno@yandex.ru

**EFFECT OF DURATION OF AGE-HARDENING ON MECHANICAL PROPERTIES AND
PHASE COMPOSITION OF HIGH-NITROGEN AUSTENITIC STEELS**A.S. Mihno¹, M.Yu. Panchenko², I. A. Tumbusova¹

Scientific Supervisor: assistant professor, Doctor of Sciences (Phys & Math) E.G. Astafurova

¹National Research Tomsk Polytechnic University,

Russia, Tomsk, Akademichesky pr. 2/4, 634055

²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,

Russia, Tomsk, Lenin pr., 30, 634050

E-mail: nastia.mihno@yandex.ru

Abstract. The effect of age-hardening at a temperature of 700°C for 0.5-50 hours on mechanical properties and phase composition of high-nitrogen V-alloyed austenitic steel Fe-19Cr-22Mn-1,5V-0,3C-0,9N was investigated. After solid-solution treatment (1200°C, 30 min) steel possesses austenitic structure with coarse (V,Cr)(C,N) particles. Age-hardening at 700°C for 0.5-50 hours leads to discontinuous precipitation of chromium nitrides, which cause an increase in yield strength and a decrease in ductility. Aging at 700°C for 50 h results in formation of an intermetallic σ -phase, it leads to a sharp decrease in ductility.

Введение. Аустенитные нержавеющие стали благодаря антикоррозийным свойствам, податливости, высокой прочности и экологичности являются широко востребованными материалами. Многие исследования показали, что легирование стали азотом повышает прочностные свойства, стабильность аустенита, устойчивость к локальной коррозии по сравнению с традиционными нержавеющими сталями. [1]. Известно, что высокоазотистые аустенитные стали обладают термической нестабильностью в интервале 500–1000°C: происходят процессы образования карбидов (Cr_{23}C_6), прерывистое выделение нитридов Cr_2N , а также выделение интерметаллидной σ -фазы, что может приводить к ухудшению механических характеристик [2]. Добавление сильных карбидо- и нитридообразователей, таких как ванадий, уменьшает негативные эффекты от формирования частиц Cr_2N [3]. Распределение и морфология выделившихся частиц являются важными факторами, определяющими механические и пластические свойства высокоазотистых сталей, что требует дальнейших исследований.

Материалы и методы. Для исследования была выбрана высокоазотистая ванадийсодержащая аустенитная сталь Fe-19Cr-22Mn-1.5V-0.15Ni-0.3C-0.86N (мас. %) (ВАС). После горячей прокатки при температуре 1150°C из пластин вырезали образцы для испытаний на растяжение в форме двойных лопаток с размерами рабочей части: 1,3 × 2,5 × 18 мм. Далее проводили закалку образцов после выдержки при температуре 1200°C (30 мин.), затем старение при температуре 700°C (0,5-50 ч). Старение образцов проводили в среде инертного газа с последующей закалкой в воду. Для исследования микроструктуры образцов проводили стандартную обработку шлифованием, а затем электролитическую полировку в растворе 25 мл CrO₃ + 210 мл H₃PO₄. Поверхности образцов были исследованы при помощи световой микроскопии (Altami Met 1C). Дифрактометр DRON-7 с Co-Kα излучением использовали для исследования фазового состава стали. Одноосное растяжение образцов с начальной скоростью 5 × 10⁻⁴ с⁻¹ проводили при комнатной температуре на установке LFM 125 (Walter+Bai AG).

Результаты. На рентгенограмме, соответствующей исходному состоянию ВАС (после закалки от 1200°C, 30 мин) (рис.1), наблюдали рефлексы от азотистого аустенита γ_{N1} с параметром решётки $a=3,63 \text{ \AA}$. Также обнаружены рефлексы с межплоскостными расстояниями, соответствующими частицам на основе ванадия (V,Cr)(C,N) (ГЦК). Электронно-микроскопическое изображение частиц (V,Cr)(C,N) представлено на рисунке 2а, размер частиц составляет 300 – 400 нм. Старение при температуре 700°C

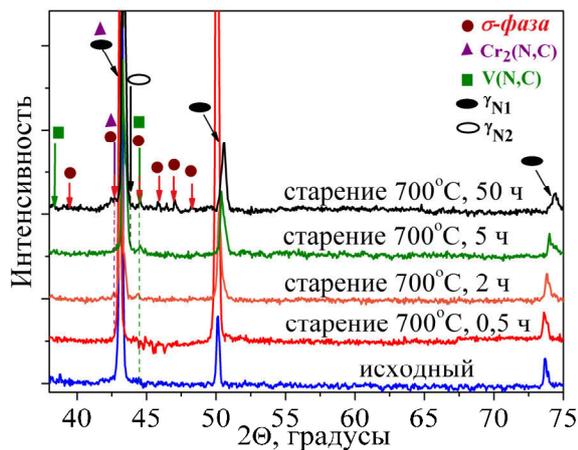


Рис. 1. Влияние продолжительности старения при температуре 700°C на рентгенограммы, полученные для образцов ВАС

продолжительностью 0,5-50 ч вызывает изменения на рентгенограммах, появляются линии нитрида хрома Cr₂N, аустенита с параметром решетки $\gamma_{N2}=3,58 \text{ \AA}$, меньшим, чем в исходной аустенитной фазе до старения $\gamma_{N1}=3,63 \text{ \AA}$ (рис. 1). На металлографических шлифах так же обнаружены свидетельства прерывистого распада аустенита с образованием пластин нитрида хрома Cr₂N по границам аустенитного зерна (рис. 2 б). Также в ходе гомогенных реакции происходит формирование частиц V(N,C) в теле зерен. После старения 700°C, 0,5 ч на металлографических шлифах наблюдали повышенную травимость границ, зерен и центры зарождения прерывистого распада аустенита с образованием частиц Cr₂N и γ_N . При увеличении времени старения видно, что реакция распада произошла не только по границам зерен, но и распространилась вглубь зерна (рис 2 в). С увеличением продолжительности старения доля зерен, претерпевших распад, растет. При большой продолжительности старения (50 ч) на границах зерен, претерпевших прерывистый распад и обедненных по азоту, происходит выделение σ -фазы, которая выявляется методом рентгенофазового анализа (рис. 1) и при электронно-микроскопических исследованиях.

Описанная последовательность фазовых и структурных превращений коррелирует с изменениями пластических и прочностных свойств стали Fe-19Cr-22Mn-1,5V-0,3C-0,9N. В таблице 1 приведены данные исследований механических свойств при одноосном растяжении образцов стали Fe-19Cr-22Mn-1,5V-0,3C-0,9N, состаренных в течение 0,5-50 часов.

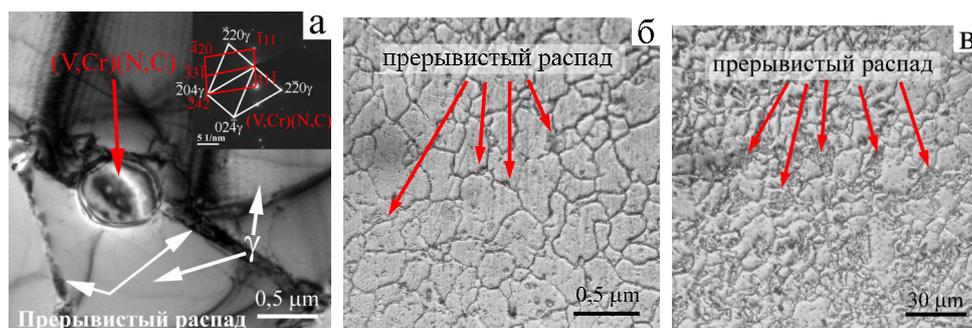


Рис. 2. Электронно-микроскопическое светлопольное изображение структуры ВАС после старения при 700°C, 2 ч (а). Изображения протравленных поверхностей образцов, полученные методом световой микроскопии, после старения при 700°C, 0,5 ч(б) и 2 ч(в)

Анализ представленных данных показывает, что увеличение продолжительности старения с 0,5 ч до 50 ч приводит к повышению предела текучести и значительному снижению пластичности, что обусловлено прерывистым выделением нитридов $\text{Cr}_2(\text{N,C})$ и гомогенным ростом частиц $\text{V}(\text{N,C})$. При длительной выдержке в течение 50 ч наблюдается максимальное значение предела текучести $\sigma_{0,2} = 974$ МПа и почти полная потеря пластичности. Образцы, состаренные при 700°C в течение 50 ч, разрушаются вблизи предела текучести, что связано с дисперсным твердением и формированием хрупкой интерметаллидной σ -фазы на границах зёрен (рис. 1), которая приводит к дополнительному охрупчиванию ВАС.

Таблица 1

Влияние продолжительности старения при температуре 700°C на механические свойства ВАС

Механические свойства	Старение при температуре 700°C				
	-	0,5 ч	2 ч	5 ч	50 ч
$\sigma_{0,2}$, МПа	740	791	805	926	974
σ_B , МПа	1811	1670	1567	1365	1153
δ удлинение, %	53	33	24	8	1
ϵ , однородное удлинение	0,35	0,23	0,19	0,06	-

Заключение. Закаленные образцы (1200°C, 30 мин) высокоазотистой ванадийсодержащей стали с однородно распределёнными крупными частицами $(\text{V,Cr})(\text{N,C})$ обладают высокими прочностными свойствами и хорошей пластичностью. В ходе старения при температуре 700°C в течение 0,5-50 ч происходит комплексная реакция прерывистого распада аустенита с образованием нитридов хрома Cr_2N и непрерывное выделение нитридов ванадия. Дисперсионное твердение приводит к росту предела текучести и снижению пластичности стали.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-19-01197).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сагарадзе В.В., Уваров А.И. Упрочнение и свойства аустенитных сталей. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. – 720 с.
- Qin F., Li Y., He W., et al. Aging precipitation behavior and its influence on mechanical properties of Mn18Cr18N austenitic stainless steel // Met. Mater. Int. – 2017. – Vol.23. – № 6. – pp.1087–1096.
- Blinov V. M. Progress in the study of high-nitrogen corrosion-resistant aging nonmagnetic vanadium steels // Russian Metallurgy. – 2007. – Vol.2. – № 2007. – pp.127–135.