

УДК 669.15-194

Влияние температуры закалки на структуру и механические свойства коррозионностойкой мартенситно - аустенитной криогенной стали

Самойлова Маргарита Анатольевна^{1(*)}r_sm@inbox.ru
SPIN-код: 5566-9700Лукин Евгений Игоревич¹flattop@yandex.ru
SPIN-код: 1097-1567Севальнев Герман Сергеевич²sevalnevgs@gmail.com
SPIN-код: 8921-7996¹ ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия² НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ, Москва, Россия

Аннотация. Исследованы структура и механические свойства коррозионностойкой мартенситно-аустенитной криогенной стали 05X16АН5Ф со сверхравновесным содержанием азота (0,28 % масс.) после закалки от различных температур. Установлено, что лучшее сочетание высокой прочности ($\sigma_B = 1292$ МПа, $\sigma_{0,2} = 508$ МПа), пластичности ($\delta = 27,4$ %, $\psi = 42,4$ %) и ударной вязкости ($KCU^{+20^\circ C} = 3,28$ МДж/м², $KCU^{-196^\circ C} = 2,58$ МДж/м²) достигается у стали 05X16АН5Ф после закалки от 950 °С с охлаждением в воде, что обусловлено формированием мелкозернистой ($d_{cp} \sim 25$ мкм) структуры азотистого мартенсита (~ 46 %) и аустенита (~ 54 %) и небольшого количества дисперсных частиц нитридов хрома и ванадия (Cr_2N и VN) (< 1 %).

Ключевые слова: мартенсит, аустенит, азот, термическая обработка, механические свойства, коррозионная стойкость, криогенная сталь

Effect of quenching temperature on the structure and mechanical properties of corrosion - resistant martensitic - austenitic cryogenic steel

Samoylova Margarita Atatol'evna^{1(*)}r_sm@inbox.ru
SPIN-code: 5566-9700Lukin Evgeny Igorevich¹flattop@yandex.ru
SPIN-code: 1097-1567Seval'nev German Serggeevich²sevalnevgs@gmail.com
SPIN-code: 8921-7996¹ IMET RAS, Moscow, Russia² NRC Kurchatov Institute – VIAM, Moscow, Russia

Abstract. The structure and mechanical properties of corrosion-resistant martensitic-austenitic cryogenic steel 05Kh16AN5F with a superequilibrium nitrogen content after quenching at various temperatures have been studied. It was found that the best combination of high strength ($\sigma_B = 1292$ МПа, $\sigma_{0,2} = 508$ МПа), ductility ($\delta = 27.4$ %, $\psi = 42.4$ %)

and toughness ($KCU^{+20^{\circ}\text{C}} = 3.28 \text{ MJ/m}^2$, $KCU^{-196^{\circ}\text{C}} = 2.58 \text{ MJ/m}^2$) is achieved in 05Kh16AN5F steel, after quenching from 950°C with cooling in water, it is caused by the formation of a fine-grained ($d_{cp} \sim 25$ microns) structure of nitrogenous martensite ($\sim 46\%$) and austenite ($\sim 54\%$) and a small number of dispersed particles of chromium and vanadium nitrides (Cr_2N and VN) ($< 1\%$).

Keywords: martensite, austenite, nitrogen, corrosion-resistant steels, heat treatment, mechanical properties, cryogenic steel

Введение. Развитие таких отраслей, как аэрокосмическая, ракетная, топливно-энергетическая, связано с решением задач по созданию новых материалов, обладающих повышенной прочностью и вязкостью разрушения при низких температурах ($T \leq -196^{\circ}\text{C}$) [1].

Широкое применение в качестве материала для деталей и конструкций низкотемпературной техники нашли коррозионностойкие стали. Аустенитные коррозионностойкие стали типа 08X18H10T (AISI 304), 03X17H13M3 (AISI 316) обладают хорошей технологичностью при производстве, высокой пластичностью ($\delta \geq 30\%$) и ударной вязкостью ($KCU^{-196^{\circ}\text{C}} \geq 1,2 \text{ МДж/м}^2$) при криогенных температурах ($T \leq -196^{\circ}\text{C}$). Основными их недостатками являются низкая статическая прочность ($\sigma_{0,2} \leq 200\text{--}250 \text{ МПа}$), а также высокое содержание дорогостоящих легирующих элементов — никеля и молибдена. Мартенситные коррозионностойкие стали типа 03X12H10MT, 03X10H8MK5Ф обладают высокой статической прочностью ($\sigma_{0,2} \geq 800\text{--}1100 \text{ МПа}$). Основными их недостатками являются низкая пластичность ($\delta \leq 15\%$) и ударная вязкость ($KCU^{-196^{\circ}\text{C}} \leq 0,5 \text{ МДж/м}^2$) при криогенных температурах, пониженная технологичность при производстве, а также высокое содержание дорогостоящих легирующих элементов — никеля, молибдена, кобальта.

Мартенситно-аустенитные коррозионностойкие стали обладают, наряду с высокой прочностью ($\sigma_{0,2} \geq 700\text{--}1100 \text{ МПа}$), более высокой ударной вязкостью ($KCU^{-196^{\circ}\text{C}} \leq 0,8 \text{ МДж/м}^2$) при криогенных температурах, повышенной технологичностью по сравнению с мартенситными коррозионностойкими сталями.

Анализ литературных данных показал, что для повышения надежности и долговечности высоконагруженных деталей и конструкций низкотемпературной техники требуется высокопрочная ($\sigma_{0,2} \geq 650 \text{ МПа}$) экономно-легированная коррозионностойкая сталь с повышенной ударной вязкостью ($KCU^{-196^{\circ}\text{C}} \geq 1,2 \text{ МДж/м}^2$) при криогенных температурах [2–4]. Применяемые в настоящее время коррозионностойкие стали не в полной мере отвечают указанным требованиям.

Одним из перспективных направлений решения отмеченной проблемы повышения ударной вязкости ($KCU^{-196^{\circ}\text{C}} \geq 1,2 \text{ МДж/м}^2$) при сохранении высокой прочности ($\sigma_{0,2} \geq 650 \text{ МПа}$) является частичная или полная замена углерода на азот.

Материалы и методы. Выплавку стали 05X16AN5Ф (0,28 % N) проводили методом электрошлакового переплава под давлением (27 атм.), электрод для ЭШПД выплавляли из чистых шихтовых материалов в индукционной печи.

Слиток перед ковкой был разрезан на две части. Металл нагревали под ковку с печью до 1150–1160 °С. Части слитка были откованы на молоте. Охлаждение металла послековки — на воздухе. Термическая обработка образцов стали 05X16АН5Ф проводилась в лабораторных печах. Образцы из стали 05X16АН5Ф закаливали в воде в интервале температур 800–1200 °С с выдержкой 30 минут и охлаждение в воде.

Твердость образцов измеряли по Роквеллу при нагрузке 150 кгс (шкала С) в соответствии с ГОСТ 9013–59 [5] на твердоме Wilson 3JR.

Для определения прочности на растяжение и ударной вязкости были изготовлены образцы из кованных заготовок сечением 14×14 мм. Испытания на растяжение проводили по ГОСТ 1497–84 [6] на установке Instron 3382 на цилиндрических образцах с резьбовой головкой, имеющих расчетную часть $L_0 = 5d_0$ ($d_0 = 5$ мм), при 20 °С, с определением временного сопротивления σ_B , МПа, предела текучести $\sigma_{0,2}$, МПа, относительного удлинения δ , % и относительного сужения ψ , %.

Для оценки способности материала выдерживать ударные нагрузки, проводили испытания на ударный изгиб по ГОСТ 9454–78 [7] на установке Zwick/Roell Amsler RKP-450 при ударе маятника по образцу со стороны, противоположной концентратору напряжения. Энергия маятникового копра составила 300 Дж. Для испытаний были изготовлены образцы с U-образным надрезом высотой 2 мм.

Микроструктуру стали изучали с помощью оптического микроскопа Olympus GX-51, имеющих приставки для записи и анализа цифровых изображений. Образцы стали запрессовывали в бакелит на приборе для горячей запрессовки Opal 400. Затем последовательно шлифовались на бумаге с размером зерна 200, 160, 125, 40, 25,8 и 14 мкм и полировались на сукне алмазной эмульсией с размером зерна 6, 3 и 1 мкм на автоматической шлифовальной машине Saphir 250. Скорость вращения диска машины составляла 150 оборотов в минуту, давление на один образец в бакелитовой оправке (с диаметром оправки 4 см) равнялось 30 Н, или около 2,5 Н/см², время каждой стадии составляло 3–4 минуты.

Отполированные образцы подвергались травлению. Состав травителя: 3 части HCl, 1 часть HNO₃ и 1 часть глицерина. Для ускорения протекания процесса травления образцы подогревались в кипящей воде в течение ~20 с. Процесс травления заканчивали, удаляя ватным тампоном со шлифа остатки травителя и продукты реакции под струей воды. Затем шлиф высушивали фильтровальной бумагой.

Фазовый состав и параметр кристаллической решетки аустенита образцов после различных вариантов термической обработки изучали на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 (в железном излучении). Для повышения достоверности результатов поверхность шлифов подвергали дополнительному травлению для гарантированного устранения возможного наклепа (связанного с разрезкой и механическим шлифованием).

Результаты и их обсуждение. Температура закалки может оказывать существенное влияние, на структуру и механические свойства коррозионно-стойких азотосодержащих мартенситно-аустенитных сталей, так как определяет количество растворившихся избыточных фаз (нитридов, карбонитридов) и соответственно концентрацию элементов внедрения (С и N) в α - и γ -твердом растворе, а соответственно фазовый состав стали.

Повышение температуры закалки от 800 до 1150 °С приводит к снижению твердости стали 05X16АН5Ф (рис. 1, а), при этом средний размер зерна аустенита (d_{cp}) увеличивается от 25 до 130 мкм (рис. 1, б). Значительный рост среднего размера зерна аустенита происходит после нагрева выше 1050 °С.

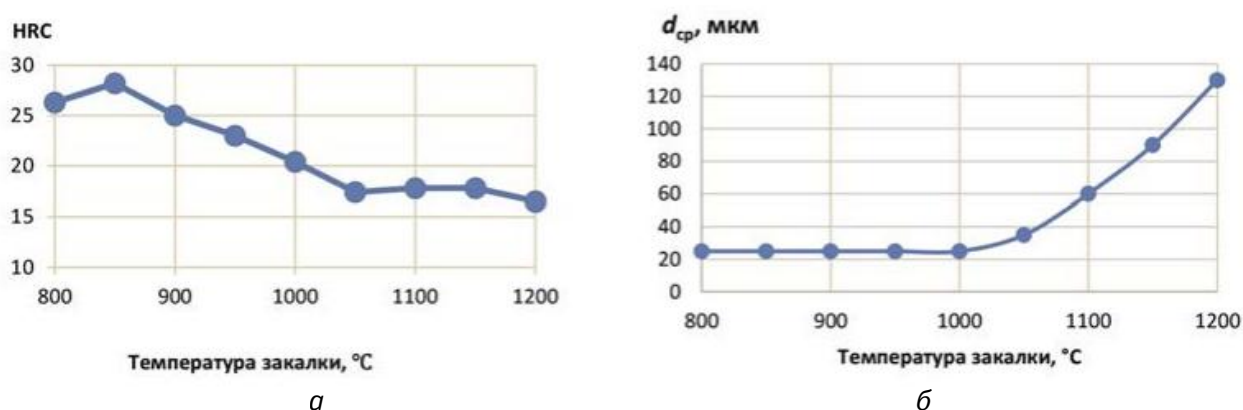


Рис. 1. Влияние температуры закалки на твердость (HRC) (а) и на средний размер зерна аустенита (d_{cp}) (б) стали 05X16АН5Ф

Анализ результатов рентгеноструктурных исследований показал, что снижение твердости с повышением температуры закалки от 800 до 1150 °С обусловлено изменением фазового состава исследуемой стали (рис. 2) — увеличением количества аустенита от 53 до 60 % и уменьшением количества мартенсита от 47 и до 40 %.

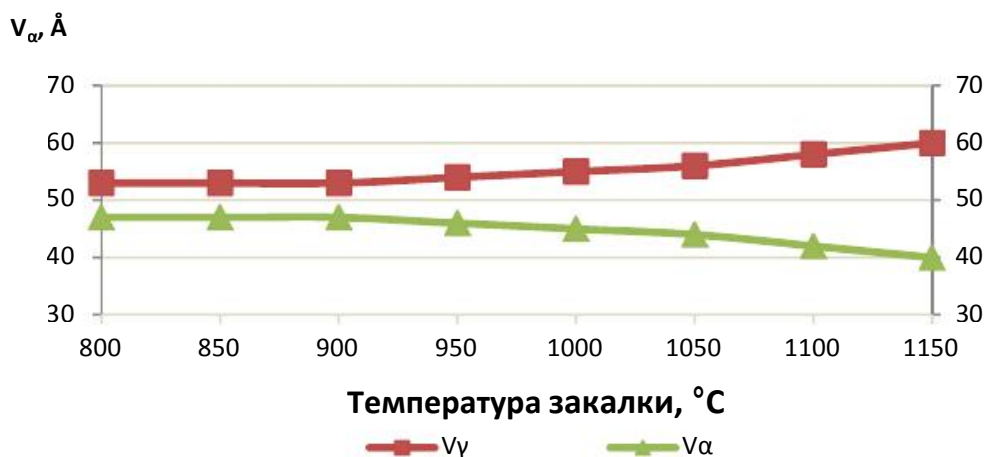


Рис. 2. Влияние температуры закалки на количество мартенсита (V_α) и аустенита (V_γ) стали 05X16АН5Ф

Изменение фазового состава стали 05X16АН5Ф обусловлено растворением нитридов (Cr_2N , VN) и переходом азота и углерода в α - и γ -твердый раствор, что подтверждается исследованиями параметров кристаллических решеток мартенсита и аустенита. Увеличение параметров кристаллических решеток мартенсита и аустенита с повышением температуры закалки от 900 до 1100 °С связано с растворением нитридов хрома (Cr_2N) и нитридов ванадия (VN). Увеличение температуры закалки выше 1100 °С не приводит к изменению параметров кристаллических решеток фаз, что связано с полным растворением частиц нитридов.

С повышением температуры закалки от 800 до 1150 °С происходит снижение показателей прочности (HRC , σ_{B} , $\sigma_{0,2}$) стали 05X16АН5Ф, при этом увеличиваются показатели пластичности (δ , ψ) и ударной вязкости (KCU) при комнатной и пониженной (–196 °С) температуре (рис. 3 а и б), что связано с увеличением количества остаточного аустенита и растворением частиц нитридов (Cr_2N , VN).

С увеличением температуры закалки от 800 до 1100 °С ударная вязкость как при комнатной, так и при отрицательной (–196 °С) температуре стали 05X16АН5Ф увеличивается с 2,36 до 3,75 МДж/м² и с 1,52 до 3,12 МДж/м² соответственно (рис. 4).

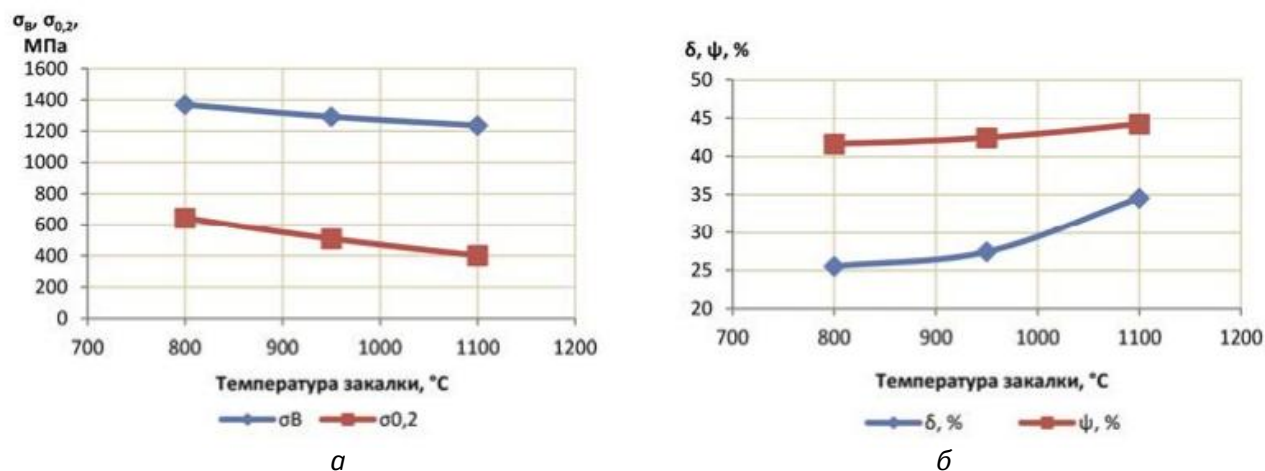


Рис. 3. Влияние температуры закалки на прочность (σ_{B} , $\sigma_{0,2}$) (а) и пластичность (δ , ψ) (б) стали 05X16АН5Ф

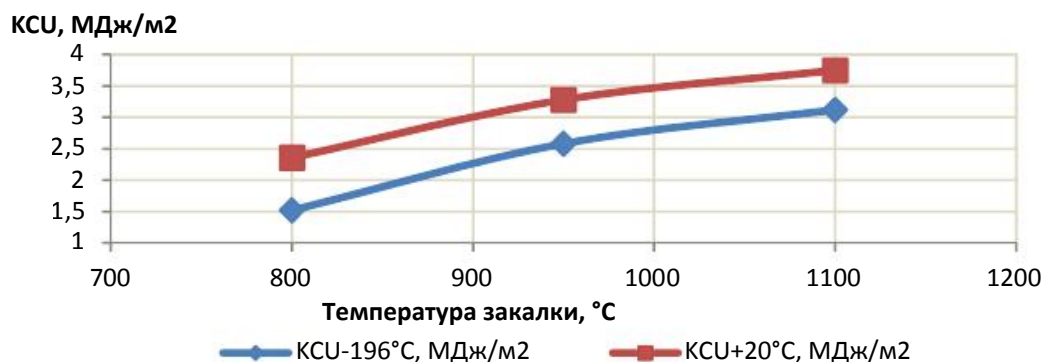


Рис. 4. Влияние температуры закалки на ударную вязкость (KCU) стали 05X16АН5Ф

Закключение. С повышением температуры закалки от 800 до 1150 °С в стали 05X16АН5Ф происходит увеличение количества аустенита с ~ 53 до 60 % и уменьшение количества мартенсита с 47 до 40 %, что связано с растворением частиц нитридов хрома и ванадия (Cr_2N и VN) и обогащением γ -твердого раствора сильными аустенитообразующими элементами — азотом и углеродом. Увеличение среднего размера зерна аустенита при температурах выше 1050 °С связано с растворением частиц нитридов.

С повышением температуры закалки от 800 до 1150 °С происходит снижение прочности (HRC , σ_{B} , $\sigma_{0,2}$) стали 05X16АН5Ф, что связано с увеличением количества аустенита и уменьшения количества мартенсита, при этом возрастают пластичность и ударная вязкость. Лучшее сочетание высокой прочности, ($\sigma_{\text{B}} = 1292 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 508 \text{ МПа}$), пластичности ($\delta = 27,4 \%$, $\psi = 42,4 \%$) и ударной вязкости ($\text{KCU}^{+20^\circ\text{C}} = 3,28 \text{ МДж/м}^2$, $\text{KCU}^{-196^\circ\text{C}} = 2,58 \text{ МДж/м}^2$) достигается у стали 05X16АН5Ф после закалки от 950 °С с охлаждением в воде обусловлено формированием мелкозернистой ($d_{\text{cp}} \sim 25 \text{ мкм}$) структуры азотистого мартенсита (~ 46 %) и аустенита (~ 54 %) и небольшого количества дисперсных частиц нитридов (< 1 %).

Список источников

- [1] Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И., Пирайнен В.Ю. *Специальные материалы в машиностроении*. Санкт-Петербург, ХИМИЗДАТ, 2004, 640 с.
- [2] Солнцев Ю.П., Степанов Г.А. *Конструкционные стали и сплавы для низких температур*. Москва, Металлургия, 1985, 271640 с.
- [3] Ульянин Е.А., Сорокина Н.А. *Стали для криогенной техники: справочник*. Москва, Металлургия, 1984, 208 с.
- [4] Банных О.А., Ковнеристый Ю.К. *Стали для работы при низких температурах*. Москва, Металлургия, 1969, 191 с.
- [5] ГОСТ 9013–59. *Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу*. Москва ИПК Издательство стандартов, 2002.
- [6] ГОСТ 1497–84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. Москва Стандартиформ, 2008.
- [7] ГОСТ 9454–78. *Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах*. Москва, ИПК Издательство стандартов, 2008.