



ВЛИЯНИЕ МЕЖЗЕРЕННЫХ И МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ СТАЛИ С δ -ФЕРРИТОМ

Панченко М.Ю.¹, Астафурова Е.Г.¹, Михно А.С.^{1,2}

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, ²НИ Томский политехнический университет

Введение

В настоящее время существует множество технических задач, для решения которых требуется всестороннее исследование свойств материалов, работающих в водородосодержащих средах. На данный момент для изготовления конструкций, работающих в водородной среде, используют стабильные аустенитные стали, поскольку они являются наиболее устойчивыми среди сталей к негативному влиянию водорода. Хромомарганцевые аустенитные стали с высоким содержанием азота обладают хорошей износостойкостью, устойчивостью к коррозии и высокими прочностными свойствами. Легирование стали азотом приводит к повышению прочностных свойств, при этом сохраняет достаточную пластичность. Несмотря на очевидный выигрыш хромомарганцевых азотистых сталей в прочностных свойствах и стоимости, их использование также связано с рядом ограничений. Так, часто хромомарганцевые стали, полученные методами промышленного литья, содержат некоторую долю высокотемпературного феррита. Известно, что феррит обладает высокой диффузией водорода и низкой растворимостью водорода; наоборот, аустенит обладает низкой диффузией водорода и высокой растворимостью водорода. Таким образом, феррит может действовать как «путь» для транспортировки водорода, в то время как аустенит является «поглотителем», задерживая его. Таким образом, представляет интерес изучить, как объемная доля феррита и плотность межзеренных и межфазных границ влияют на устойчивость к водородному охрупчиванию высокоазотистых сталей.

Методика эксперимента

Для исследований была выбрана хромомарганцевая высокоазотистая сталь: **Fe-23Cr-17Mn-0.1C-0.6 (ВАС)**.

- Для растяжения вырезали образцы в форме двойных лопаток с размерами рабочей части $0,5 \times 2,5 \times 18$ мм.
- Термические обработки образцов проводили при температурах $T_{об} = 1050^\circ\text{C}$, 1100°C , 1150°C и 1200°C в течение 30 мин с последующей закалкой в воду.
- **Электролитическое насыщение образцов водородом** осуществляли при комнатной температуре в 3% водном растворе NaCl, содержащем 3 г/л NH_4SCN . Продолжительность обработки составила 100 ч при плотности тока 100 A/m^2 .
- Одноосное растяжение с начальной скоростью $5 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ проводили при комнатной температуре на установке LFM 125 (Walter+Bai AG, Швейцария).
- Рентгеноструктурный (РСА) и рентгенофазовый (РФА) анализ проводили с использованием дифрактометра DRON-3 в $\text{Cu-K}\alpha$ излучении.

Зеренная структура и поверхности разрушения образцов была изучена методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, микроскоп QUANTA 200 3D, оснащенный системой анализа структуры и текстуры кристаллических материалов методом дифракции отраженных электронов (EBSD) PEGASUS)

Результаты

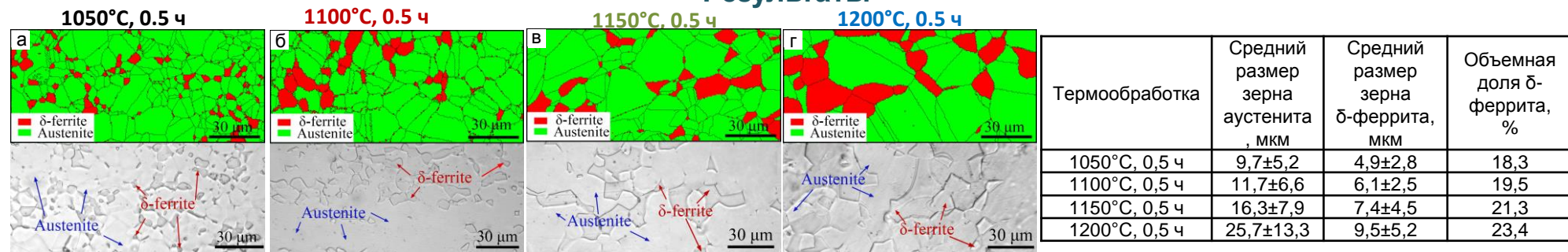


Рисунок 1 - EBSD-изображения (фазовое картирование) и изображения, полученные методом световой микроскопии, поверхности образцов ВАС после закалок 1050-1200°C, 0,5 ч

Структура ВАС после термообработок при всех $T_{об}$, представляла собой аустенит с небольшим содержанием δ -феррита (объемная доля $f = 18-23\%$). Было установлено, что с увеличением температуры $T_{об}$ объемная доля δ -феррита незначительно увеличивается, при этом возрастает средний размер зерна аустенита и δ -феррита, следовательно, уменьшается плотность межфазных и межзеренных границ.

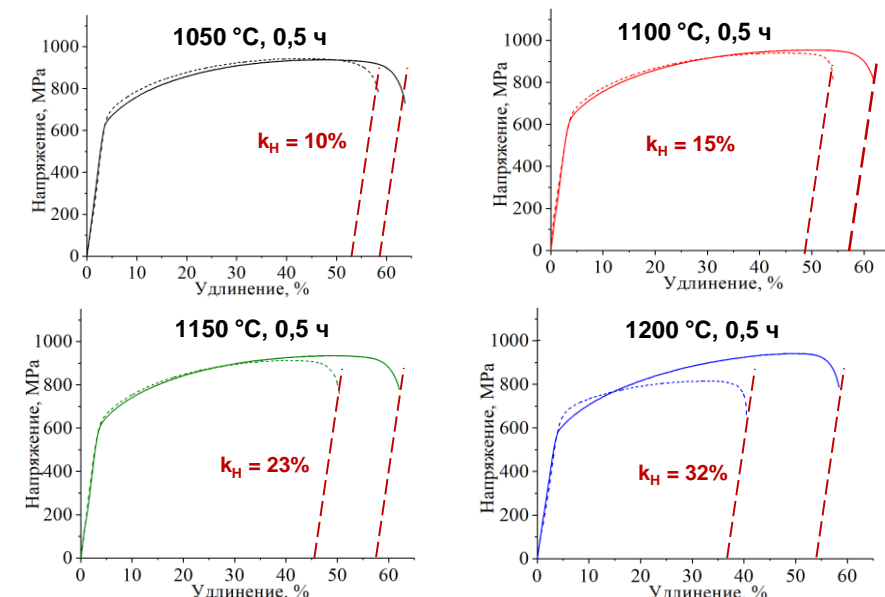


Рисунок 2. Инженерные кривые течения ВАС-образцов после термообработки по разным режимам ($T_{об} = 1050-1200^\circ\text{C}$, 0,5 ч). Коэффициент водородного охрупчивания $k_H = [(\delta_0 - \delta_H) / \delta_0] \times 100\%$, δ_0 и δ_H - полное удлинение до разрушения не наводороженных и наводороженных образцов соответственно.

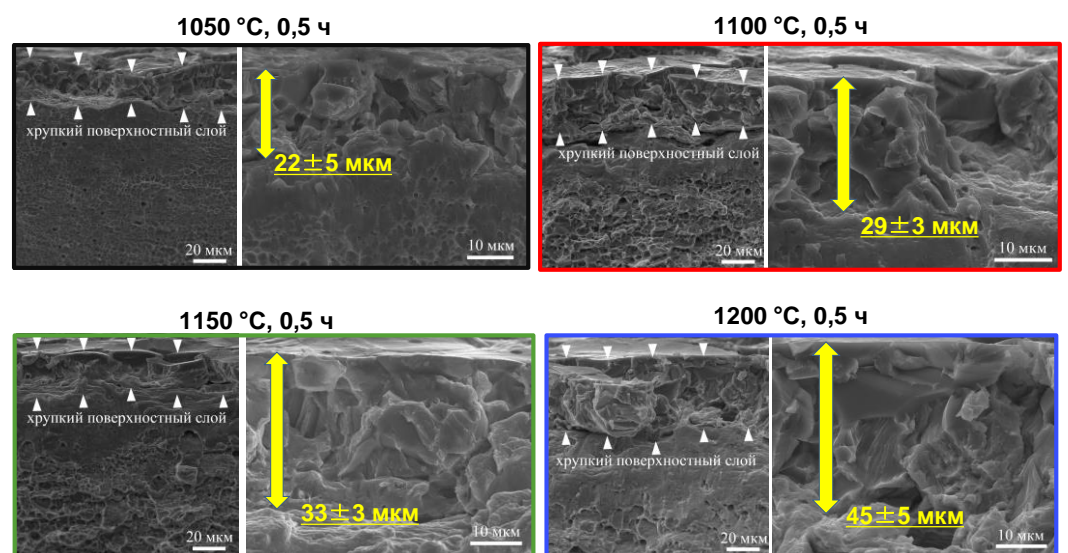


Рисунок 3. СЭМ-изображения поверхностей разрушения ВАС-образцов после термообработки по разным режимам ($T_{об} = 1050-1200^\circ\text{C}$, 0,5 ч)

Предел текучести стали $\sigma_{0,2}$ зависит от температуры $T_{об}$: максимальное значение $\sigma_{0,2} = 630$ МПа соответствует обработке при 1050°C , а с увеличением $T_{об}$ происходит плавное снижение $\sigma_{0,2}$. Удлинение до разрушения образцов изменяется слабо с ростом $T_{об}$. Насыщение водородом приводит к повышению предела текучести (твердорастворное упрочнение атомами водорода) и уменьшению пластичности образцов ВАС независимо от их исходной термообработки. После отжига при температуре 1050°C (с максимальной плотностью межфазных и межзеренных границ) образцы демонстрируют минимальный коэффициент водородного охрупчивания $k_H = 10\%$. При увеличении $T_{об}$ величина k_H возрастает. После насыщения водородом происходит изменение микромеханизма разрушения ВАС от вязкого ямочного излома в отсутствие водорода к хрупкому в поверхностном наводороженном слое. Наибольшая толщина наводороженного слоя 45 ± 5 мкм характерна для образцов после обработки при 1200°C , и разрушение в них происходит транскристаллитно по механизму квазискола. Толщина наводороженного слоя уменьшается при увеличении плотности межфазных и межзеренных границ и уменьшении доли феррита. При этом на поверхности разрушения в наводороженном слое наблюдается преимущественно интеркристаллитных трещин.

Заключение

Таким образом, формирование меньшего размера зерна (аустенита и δ -феррита) и более низкое содержание δ -феррита обеспечивают более высокую плотность межзеренных и межфазных (аустенит/ δ -феррит) границ, которые способствуют интеркристаллитному разрушению поверхностных наводороженных слоев и подавляют диффузию атомов водорода вглубь образцов, повышая устойчивость ВАС к водородному охрупчиванию.