

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО–МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛОВ АУСТЕНИТНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ ВОДОРОДОМ

Г.М. Рахатова

Научный руководитель: к. ф.-м. наук Е.И. Купрекова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

E-mail: rahatova_gulerke@mail.ru

HYDROGEN EFFECTS IN SINGLE CRYSTAL AUSTENITIC STAINLESS STEEL AND ITS PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES

G.M. Rakhatova

Scientific Supervisor: c.ph.-m.s. E.I. Kuprekova

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: rahatova_gulerke@mail.ru

Single crystals of austenite stainless steel Fe – 18% Cr – 14% Ni – 2% Mo (I) were investigated in order to reveal the mechanical properties determined by hydrogen effect. As experimental data shows, hydrogen effect enhances strength of the material and affects orientation dependence of the mechanical behavior.

Для выяснения физической природы влияния водорода на механические свойства и разрушение аустенитных сталей необходимо проведение систематических исследований на монокристаллах аустенитных нержавеющей сталей.

Для исследования были выбраны монокристаллы стали Fe – 18% Cr – 14% Ni – 2% Mo (I), дополнительно упрочненной азотом 0,3 мас.% с низкой энергией дефекта упаковки $\gamma_{0y} = 0.02-0.03$ Дж/м². Выбор материала связан с тем, что это сталь без атомов внедрения характеризуется низкими прочностными свойствами и при 77 К могут испытывать $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \varepsilon$ мартенситные превращения. Легирование азотом 0,3 мас.% приводит к твердорастворному упрочнению, которое оказывается значительным при 77К. Азот стабилизирует аустенит, и $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \varepsilon$ мартенситные превращения не наблюдаются. Согласно литературным данным на поликристаллах легирование водородом монокристаллов аустенитных нержавеющей сталей в низкой γ_{0y} должно приводить к сильным эффектам твёрдорастворного упрочнения либо разупрочнения, связанным с различной диффузионной подвижностью атомов водорода и азота [1]. При твердорастворном упрочнении атомами водорода в монокристаллах стали Fe – 18% Cr – 14% Ni – 2% Mo – 0,3N с низкой γ_{0y} возможно появление ориентационной зависимости критических скалывающих напряжений $\tau_{кр}$. При разупрочнении будет происходить локализация пластической деформации и вырождение множественности сдвига. Ранее такого рода эксперименты не проводились.

Для решения поставленных задач монокристаллы стали Fe – 18% Cr – 14% Ni – 2% Mo - 0,3N (мас.%). выращивали методом Бриджмена в атмосфере аргона. После роста кристаллы гомогенизировали при 1100 °С в течение 25 часов. Образцы в форме параллелепипеда 2,59×2,73×6,06 мм³ вырезали на элетроискровом станке. Образцы закаливали в воду после выдержки в атмосфере аргона в течение 1 часа

при 1050 °С. Образцы механически шлифовали, затем электролитически полировали в растворе 50г Cr₂O₃ + 200г H₃PO₄ при 27 °С в течение 1-2 мин. при плотности тока 18 мА/см². Наводороживание образцов проводили по методу Сиверста под давлением 2 атм. в течение 21 часа при температуре 800 °С. Измерение микротвердости проводили на анализатор микротвердости на базе ПМТ-3М, нагрузка составила $P = 20$ Н следы деформации вблизи отпечатков после наноиндентирования наблюдали с помощью оптического микроскопа *Olimpus 100*.

Экспериментально установлено, что легирование водородом монокристаллов стали Fe-18Cr-16Ni-10Mn-0,3N на протяжении 8 и 21 часа по методу Сиверста под давлением 2 атм. при 800 °С приводит к увеличению прочности кристаллов (табл. 1 – 3). Атомы водорода являются новыми препятствиями движению дислокаций при деформации и прочностные свойства увеличиваются.

Экспериментально установлено, что в монокристаллах аустенитной нержавеющей стали Fe-18Cr-16Ni-10Mn-0,3N наблюдается ориентационная зависимость $\tau_{кр}$ уже в исходном состоянии. Кристаллы [001] ориентации оказываются «мягкими», т.е. имеют меньшие значения критических скалывающих напряжений $\tau_{кр}$, чем кристаллы [012] ориентаций, которые оказываются «жесткими» (таблица 3). Таким образом, в ГЦК монокристаллах аустенитной нержавеющей стали Fe-18Cr-16Ni-10Mn, насыщенных азотом до 0,3 мас.% наблюдается отклонение от закона Боасса-Шмида о равенстве критических скалывающих напряжений. Эти данные согласуются с данными на монокристаллах аустенитных нержавеющей сталей с низкой $\gamma_{0\gamma}$, легированных азотом [2]. В данной работе экспериментально установлено, что насыщение водородом также приводит к отклонению от закона Боасса –Шмида (табл. 3) и усиливает его. Физическая причина ориентационной зависимости $\tau_{кр}$ в монокристаллах Fe-18Cr-16Ni-10Mn-0,3N может быть обусловлена следующим обстоятельством. В исходной матрице уже присутствуют атомы внедрения – атомы азота. Они являются мощными препятствиями движению полных $a/2\langle 110 \rangle$ дислокаций. Этим дислокациям согласно теории *Coupley* и *Kear* [3] энергетически выгодно в зависимости от ориентации кристалла и способа деформации испытывать дополнительное расщепление, либо дополнительное поджатие. В кристаллах [001] ориентации при сжатии под наконечником микроиндентора полные $a/2\langle 110 \rangle$ дислокации испытывают дополнительное к равновесному расщепление на частичные $a/2\langle 110 \rangle$ дислокации Шокли, тогда как в «жестких» [012] ориентациях полные $a/2\langle 110 \rangle$ дислокации испытывают дополнительное к равновесному поджатие, их можно считать практически нерасщепленными. Поскольку вектора Бюргерса полных и частичных дислокаций разные и зависят от ориентации кристаллов, то и $\tau_{кр}$ оказываются разными и зависят от ориентации кристаллов. Введение атомов водорода способствует усилению ориентационной зависимости критических скалывающих напряжений.

Таблица 1. Влияние времени выдержки в водородной среде и ориентации монокристаллов аустенитной нержавеющей стали Fe-18Cr-16Ni-10Mn-0,3N на прочность по Виккерсу HV

Обработка	001	011	012
исходный	213 (209)	207 (199)	213 (196)
H ₂ , 8h*2атм, 800 К	255 (232)		
H ₂ , 21h*2атм, 800 К	226 (228)	227 (238)	209 (219)

Таблица 2. Влияние времени выдержки в водородной среде и ориентации монокристаллов аустенитной нержавеющей стали Fe-18Cr-16Ni-10Mn-0,3N на предел прочности σ_B , МПа

обработка	001	011	012
исходный	705	690	705
H ₂ , 8h*2атм, 800 К	855		
H ₂ , 21h*2атм, 800 К	745	750	730

Таблица 3. Влияние времени выдержки в водородной среде и ориентации монокристаллов стали Fe-18Cr-16Ni-10Mn-0,3N на предел текучести $\sigma_{0,2} = 0,367HV$ (МПа) и критические скалывающие напряжения $\tau_{кр} = m\sigma_{0,2}$ МПа (m = фактор Шмида)

обработка	001	011	012
исходный	$\sigma_{0,2} = 78,2$ МПа	$\sigma_{0,2} = 75,9$ МПа	$\sigma_{0,2} = 78,2$ МПа
	$\tau_{кр} = 0,41 * \sigma_{0,2} = 31,3$ МПа	$\tau_{кр} = 0,41 * \sigma_{0,2} = 31,2$ МПа	$\tau_{кр} = 0,49 * \sigma_{0,2} = 38,3$ МПа
H ₂ , 21h*2атм, 800 К	$\sigma_{0,2} = 82,9$ МПа	$\sigma_{0,2} = 83,3$ МПа	$\sigma_{0,2} = 80,4$ МПа
	$\tau_{кр} = 0,41 * \sigma_{0,2} = 34,0$ МПа	$\tau_{кр} = 0,41 * \sigma_{0,2} = 34,2$ МПа	$\tau_{кр} = 0,49 * \sigma_{0,2} = 39,4$ МПа

Наводороживание способствует усилению локализации сдвига в первичной системе и подавляет действие вторичных систем скольжения. В исходном состоянии в [001], [011] монокристаллах стали Fe-18Cr-16Ni-10Mn-0,3N, ориентированных для множественного скольжения вблизи отпечатка от наноиндентора четко видно действие двух систем скольжения. Тогда как в аналогичных условиях испытания, той же самой нагрузке и времени выдержки наноиндентора на поверхности образцов в [001], [011] ориентации для множественного скольжения после наводороживания наблюдается действие только одной системы скольжения, следы скольжения становятся тонкими и слабо выраженными. Физическая причина локализации сдвига в первичной системе может быть связана с эффектом упругого экранирования из-за образования на дислокациях атмосфер Коттрела из атомов водорода. Атомы водорода подвижны при комнатных температурах, они направляются в области искажений кристаллической решётки создаваемых дислокациями, где образуются атмосферы Коттрела, которые движутся вместе с дислокациями. Атомы водорода, осажденные в виде атмосфер Коттрела залечивают эти дефектные места, происходит релаксация полей упругих напряжений, вот почему дислокациям выгоднее энергетически продолжать движение в первичных системах скольжения, а не совершать процессы поперечного скольжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов А.Н. Водород и азот в стали. – М.: Металлургия, 1968. – 283 с.
2. Литвинова Е. И., Киреева И. В., Захарова Е. Г., Лузгинова Н. В., Чумляков Ю. И., Шехитоглу Х., Караман И. Двойникование в монокристаллах стали Гадфильда // Физическая мезомеханика. – 1999. – N. 2. – С. 107 – 112.
3. Copley S.M., Kear B.H.. The dependence of the width of a dissociated dislocation on dislocation velocity. – Acta Met. – 1968. – V. 16. – № 2. – P.227–231.