

УДК 620.178.15: 539.536

ОРИЕНТАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ, СФОРМИРОВАННОГО В МОНОКРИСТАЛЛАХ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ПРИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Е.А. Загибалова^{1,2}, В.А. Москвина², А.С. Нифонтов^{1,2}

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. Е.Г. Астафурова², аспирант В.А. Москвина²

¹ Национальный 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: zagibalova-lena99@mail.ru

ORIENTATIONAL DEPENDENCE OF THE PARAMETERS OF A SURFACE HARDENED LAYER FORMED IN AUSTENITIC STAINLESS STEEL SINGLE CRYSTALS UNDER ION- PLASMA INFLUENCE

E.A. Zagibalova^{1,2}, V.A. Moskvina², A.S. Nifontov^{1,2}

Scientific Supervisors: Dr. E.G. Astafurova², PhD student V.A. Moskvina²

¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30

²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia, Tomsk, Akademicheskyy pr. 2/4

E-mail: zagibalova-lena99@mail.ru

Abstract. *In this work, we revealed the orientation dependence of the parameters of the surface layer of austenitic stainless steel single crystals, which were processed by ion-plasma treatment (IPT). During the IPT of the steel at a temperature of 550° C, phase transformations are realized in the surface layers of the specimens. For <001> single crystal, the thickness of the surface hardened layers is greater than that for the <111> one.*

Введение. Аустенитные нержавеющие стали (АНС) находят широкое применение в промышленности за счет хорошей коррозионной стойкости и пластичности. Недостатком АНС являются низкие твердость и износостойкость. Низкотемпературное ионно-плазменное азотирование (при $T < 450^\circ\text{C}$) в десятки раз повышает поверхностную твердость сталей при сохранении исходной коррозионной стойкости, за счет формирования в поверхности пересыщенного твердого раствора азота/углерода в аустените (S-фаза/ $\text{Fe-}\gamma_{\text{NC}}$). При диффузионном насыщении поликристаллов АНС глубина насыщения зависит от многих параметров, в том числе, от ориентации зерна по отношению к насыщаемой поверхности. О. Öztürk [1] при исследовании поликристаллов АНС после поверхностного насыщения азотом при 400°C выявили, что глубина поверхностного слоя в зернах с ориентацией <001> больше, чем в зернах с ориентацией <111>. Эту ориентационную зависимость глубины насыщения позднее подтвердили авторы [2] на монокристаллах АНС ($T < 450^\circ\text{C}$). В отношении исследования этого эффекта перспективными объектами для азотирования являются монокристаллы. Во-первых, использование монокристаллов исключает диффузию по границам, а во-вторых, позволяет исследовать особенности насыщения в пределах одной кристаллографической ориентации и установить ориентационную зависимость этого явления. В литературе эта зависимость в АНС рассмотрена в

інтервалі температур формування S-фази (350-430°C) і відсутствуют дослідження в інтервалі температур розпаду S-фази (>450°C). Ціллю цієї роботи являється виявлення орієнтаційної залежності параметрів упрочненого шару, формованого при іонно-плазменному дифузійному насиченні <111> і <001> монокристалів аустенітної нержавіючої сталі атомами внедрення (N і C) при 550°C.

Матеріали і методи дослідження. Об'єктами дослідження були вибрані монокристали АНС (Fe-18,6Cr-16,8Ni-0,07Mn-0,07Si-0,001C вес. %) з орієнтаціями <001> і <111> вздовж нормалі к оброблюваної поверхності. Заготовки були закалені (1100°C) в течение часа з наступним охолодженням в воду. Іонно-плазменну обробку (ІПО) проводили на установці ЕЛУ-5 при температурі $T=550^{\circ}\text{C}$ і тиску $P=300$ Па в течение 12 годин, використовували суміш газів $\text{Ar}+\text{N}_2+\text{C}_2\text{H}_2$. Мікроструктуру монокристалів до і після насичення досліджували з використанням оптичної металлографії (ОМ, Altamі MET 1С). Фазовий склад зразків був визначений з допомогою методів дифракції обернено розсіяних електронів і скануючої електронної мікроскопії (ДОЕ, СЕМ, мікроскоп Quanta 200 3D). Мікротвердість зразків вимірювали методом Віккерса з навантаженням на індентор 25 г (Duramin 5).

Експериментальні результати. На рисунках 1 а і 1 в представлені металлографічні зображення вихідної мікроструктури <001> і <111> монокристалів. Вихідні зразки мають однофазну аустенітну структуру, що підтверджується результатами ДОЕ-аналізу, СЕМ і ОМ. Після травлення монокристалів, підвергнутих ІПО, в поперечному к оброблюваної поверхності сеченні спостерігається поверхностно-упрочнена область (ПУО) і вихідна аустенітна матриця. Згідно аналізу ОМ зображень, в ПУО можна виділити дві характерні зони: поверхнові шари з сильної травимістю і підповерхнові шари з слабкої травимістю (рис. 1 б, г).

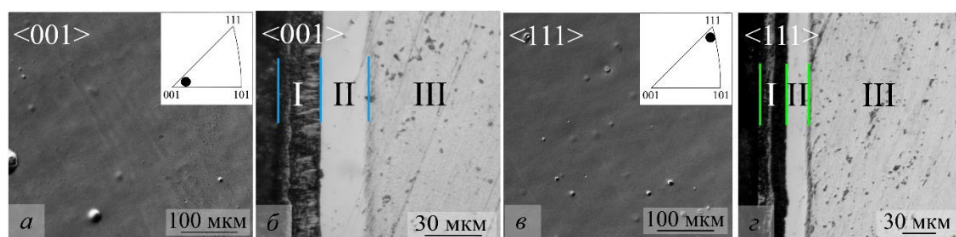


Рис. 1. Металлографічні зображення вихідної мікроструктури монокристалів АНС з орієнтаціями <001> і <111> (а, в) і протравлена мікроструктура ПУО в поперечному сеченні після ІПО (б, г). I – композиційний шар, II – дифузійний підшар, III – матриця монокристалу

Формування подібної двохшарової ПУО при ІПО (550°C) раніше спостерігали в полікристалах АНС [1], однак в разі обробки монокристалів межі упрочнених областей більш однорідні [2]. ПУО в монокристалах (рис. 1 б, г) мають однорідну і рівну межу, в відмінності від шарів, отриманих при насиченні полікристалічних зразків, де спостерігається хвиляста межа за рахунок локального зміни товщини шару від зерна к зерну. В процесі ІПО розчинення великої кількості атомарного N і C в аустеніті в поверхні монокристалів призводить к фазовим перетворенням [1]. Різниця травимість шарів пов'язана з різним фазовим складом – поверхневий шар має композиційний склад, а підповерхневий – переважно однофазний, що складається з легированного N і C аустеніта. Для досліджуваних монокристалів морфологія композиційних шарів різна. Це може свідчити про те, що в них виділяються частинки різного складу і морфології, або вони по-різному орієнтовані по відношенню к досліджуваній поверхні, тобто існує суворі кристаллографічна зв'язь

выделяемых частиц и матрицы. Для установления этих особенностей необходим детальный ПЭМ-анализ композиционных слоев в монокристаллах. Толщина ПУО в монокристаллах АНС, включающая композиционный слой и диффузионный подслоу, отличается для $\langle 001 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ ориентаций: 43 ± 2 мкм для $\langle 001 \rangle$ -монокристалла и 40 ± 2 мкм для $\langle 111 \rangle$ -монокристалла. Толщина композиционных слоев составляет 19 ± 1 мкм для $\langle 001 \rangle$ -монокристалла и 22 ± 2 мкм для $\langle 111 \rangle$ -монокристалла. Монокристалл с ориентацией $\langle 001 \rangle$ имеет более протяженный диффузионный подслоу, чем образец с ориентацией $\langle 111 \rangle$.

На рисунке 2 представлены профили распределения микротвердости по глубине ПУО в монокристаллах АНС с ориентациями $\langle 001 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ (рис. 2 а, б). Профили распределения микротвердости по глубине коррелируют с результатами ОМ, но глубина профилей превышает таковую, установленную по ОМ.

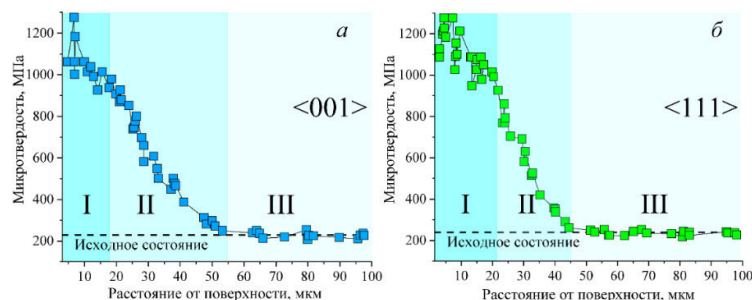


Рис. 2. Профили распределения микротвердости по глубине упрочненных слоев в монокристаллах АНС с ориентациями $\langle 001 \rangle$ (а) и $\langle 111 \rangle$ (б) после ИПО при температуре 550°C

Наибольшие значения микротвердости наблюдаются вблизи поверхности: $\langle 001 \rangle$ – 1200 МПа и $\langle 111 \rangle$ – 1275 МПа. В диффузионном подслоу наблюдается плавное снижение значений микротвердости по направлению от композиционного слоя к матрице. На профилях не наблюдается резких изменений значений микротвердости при переходе от композиционного слоя к диффузионному подслоу и матрице. Для образцов с ориентацией $\langle 001 \rangle$ профиль с постепенным снижением значений микротвердости по глубине достигает ≈ 55 мкм и выходит на «плато», а для ориентации $\langle 111 \rangle$ он составляет ≈ 45 мкм. То есть экспериментально обнаружена ориентационная зависимость глубины насыщения образцов АНС атомами внедрения.

Вывод. При ИПО $\langle 001 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ -монокристаллов АНС (550°C) происходит формирование ПУО, толщина которых зависит от кристаллографической ориентации монокристалла по направлению к обрабатываемой поверхности. Глубина ПУО для $\langle 001 \rangle$ -монокристаллов больше (≈ 55 мкм), чем для $\langle 111 \rangle$ -монокристалла (≈ 45 мкм). Несмотря на то, что профили распределения микротвердости качественно имеют близкий характер, для $\langle 001 \rangle$ -монокристаллов характерно формирование более протяженного подповерхностного диффузионного слоя.

Авторы благодарны д.ф.-м.н. Чумлякову Ю.И. за предоставленные для исследования монокристаллы и д.т.н. Рамазанову К.Н. за помощь с проведением ионно-плазменной обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Öztürk O., Williamson D. L. Phase and composition depth distribution analyses of low energy, high flux N implanted stainless steel // Journal of Applied Physics. – 1995. – V. 77, №. 8. – P. 3839-3850.
2. Martinavičius A., Abrasonis G., Möller W. Influence of crystal orientation and ion bombardment on the nitrogen diffusivity in single-crystalline austenitic stainless steel // Journal of Applied Physics. – 2011. – V. 110, №. 7. – P. 074907.