УДК 620.186

# ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ АЗОТИРОВАННЫХ СЛОЕВ В АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Е.А. Загибалова[1,2], В.А. Москвина[2]
Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. Е.Г. Астафурова[2], аспирант В.А. Москвина[2]
[1]Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
[2]Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055
E-mail: zagibalova-lena99@mail.ru

# THE EFFECT OF ION-PLASMA TREATMENT TEMPERATURE ON PHASE COMPOSITION OF NITRIDED LAYERS IN AUSTENITIC STAINLESS STEEL

E.A. Zagibalova[1,2], V.A. Moskvina[2]
Scientific Supervisors: Doctor of Sciences E.G. Astafurova[2], PhD student V.A. Moskvina[2]
[1]Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30
[2]Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Russia, Tomsk, 2/4 Akademicheskii ave., 634055
E-mail: zagibalova-lena99@mail.ru

***Abstract.*** *In this work, the effect of the temperature of ion-plasma treatment (IPT) in a mixture of nitrogen and hydrogen gases on phase composition of nitrided layers in austenitic stainless steel AISI 316L was investigated. In process of IPT at 400 ± 10 °C, a surface single-phase (S-phase) layer with a thickness of ≈ 3–4 μm is formed. With an increase the temperature of IPT by 150 °C, the layer thickness increases up to 50–60 μm and composite structure forms, which consists of nitrogen-doped austenite Fe-γN, chromium nitride CrN, α-Fe and residual austenite Fe-γ.*

**Введение.** Аустенитные нержавеющие стали (АНС) широко используются во многих областях промышленности благодаря привлекательным физико-механическим свойствам, но низкие твердость и трибологические свойства АНС могут сократить срок службы отдельных деталей конструкций и машин. Износостойкость стали может быть повышена методами инженерии поверхности (физическое или химическое осаждение покрытий из паровой фазы, плазменное напыление) или процессов диффузии (науглероживание или азотирование). Ионно-плазменное насыщение поверхностного слоя атомами внедрения (в частности, азотом) является перспективным методом модификации структуры и фазового состава поверхностных слоев АНС. Однако, если данные стали обрабатываются при температурах, обычно используемых для азотирования низколегированных сталей (около 500°C или выше), наблюдается значительное снижение коррозионной стойкости из-за выделения нитрида хрома. При использовании температур обработки ниже 500°C модифицированный поверхностный слой состоит из метастабильной фазы пересыщенного аустенита, известной как S-фаза, для которой характерны высокая твердость и коррозионная стойкость. При температурах обработки около 450°C или выше, помимо S-фазы, в поверхностных слоях присутствуют нитрид хрома CrN и α-Fe [1]. В данной работе исследовали

влияние температуры ионно-плазменного воздействия в смеси газов азота и водорода на фазовый состав азотированных слоев в аустенитной нержавеющей стали AISI 316L.

**Материалы и методы исследования.** Аустенитная нержавеющая сталь марки AISI 316L (Fe-17Cr-13Ni-2,7Mo-1,7Mn-0,5Si-0,01C масс. %) была выбрана для исследования. Предварительно гомогенизированные заготовки стали были прокатаны при комнатной температуре до степени осадки ε≈40% и отожжены в среде аргона в течение 5 ч при температуре T=1050°C с охлаждением в воду. Из полученных заготовок были вырезаны плоские образцы размерами 10×10×3 мм. Ионно-плазменное азотирование образцов проводили при температурах T=400±10°C и T=550±10°C в течение 12 часов в среде 70%$N_2$+30%$H_2$ при давлении P=300 Па. Ионно-плазменную обработку в тлеющем разряде образцов AISI 316L осуществляли на модернизированной установке ЭЛУ-5. Микроструктуру образцов в поперечном сечении исследовали с применением оптической микроскопии (микроскоп Altami MET 1C). Рентгенофазовый анализ образцов до и после азотирования проводили на дифрактометре ДРОН-7 в Co-Kα-излучении.

**Экспериментальные результаты.** На рисунке 1 представлены оптические изображения образцов стали AISI 316L в исходном состоянии (а) и после ИПО при 400°C (б) и 550°C (в). После термомеханической обработки образцы обладали крупнозернистой структурой со средним размером зерна d=55±31 мкм (рис. 1а). В процессе предварительной термомеханической обработки в заготовках не происходит фазовых превращений и образцы имеют аустенитную структуру с параметром решетки $a_{Fe\text{-}\gamma}$=3,603±0,001 нм (рис. 2). В результате ионно-плазменного насыщения, независимо от температуры, в стали формируются однородные поверхностные слои различной толщины. При температуре 400°C образуется тонкий поверхностный слой толщиной ≈ 3–4 мкм. При повышении температуры ИПО на 150°C толщина слоя увеличивается до 50–60 мкм.

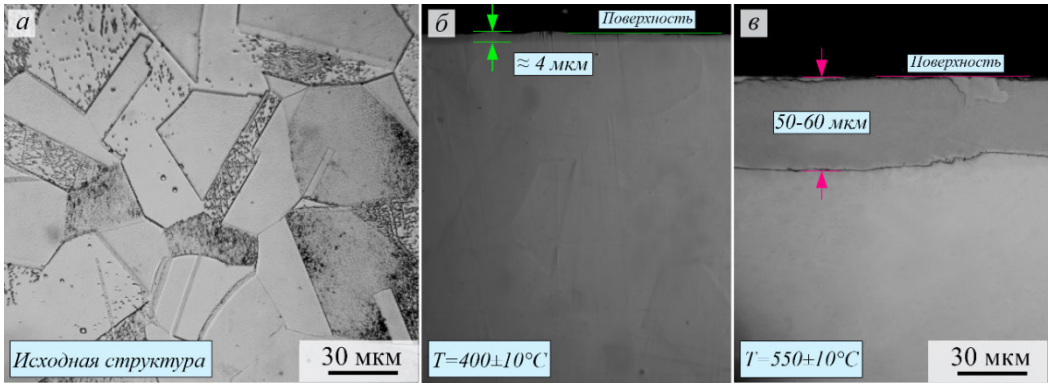


*Рис. 1. Оптические изображения исходной микроструктуры (а) и микроструктуры после ИПО при 400 ± 10°C (б) и 550 ± 10°C (в), полученной в поперечном сечении образцов*

На рисунке 2 представлены рентгенограммы для стальных образцов AISI 316L в исходном состоянии и после ИПО в зависимости от температуры обработки. Рентгенофазовый анализ свидетельствует о том, что ионно-плазменная обработка при температуре 400°C приводит к образованию в поверхностном слое пересыщенного однофазного твердого раствора азота в аустените – S-фазы с ГЦК кристаллической решеткой. S-фаза имеет характерные взаимные смещения рентгеновских линий, что происходит за счет микронапряжений и дефектов упаковки, вызванных растворением большого количества азота в аустенитной структуре. Также из-за изменения параметра решетки аустенита при ИПО происходит

снижение интенсивности, уширение и смещение пиков легированного атомами азота аустенита по отношению к исходным положениям аустенитных пиков. Параметр кристаллической решетки для S-фазы увеличивается по сравнению с данными для исходной аустенитной фазы и составляет $a_S$=4,683±0,059 нм. Фазовый состав поверхностного слоя, полученный при 550°C, включает легированный азотом аустенит Fe-$\gamma_N$ ($a_{Fe\text{-}\gamma N}$ =3,642±0,067 нм), нитрид хрома CrN ($a_{CrN}$=4,154±0.101 нм), ОЦК-железо α-Fe ($a_{Fe\text{-}\alpha}$=2,842±0,079 нм) и малую долю остаточного аустенита Fe-γ ($a_{Fe\text{-}\gamma}$=3,606±0,003 нм).

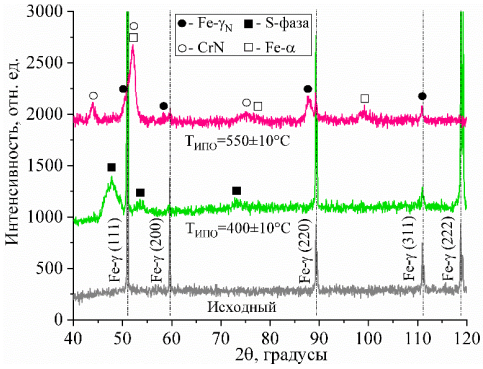


*Рис. 2. Рентгенограммы для образцов стали AISI 316L до и после ИПО при температурах 400 °C и 550 °C*

Несмотря на то, что при температуре 400°C образуется однофазная структура аустенита с высоким количеством атомов внедрения, полученный слой очень тонкий (до 4 мкм). При повышении температуры ИПО на 150°C при одинаковом времени обработки толщина азотированного слоя увеличивается в десятки раз, что связано с повышением коэффициента диффузии азота в структуре стали при повышении температуры [2]. При этом пересыщенная азотом аустенитная фаза претерпевает распад, в результате которого формируется композиционный слой сложного состава. Эти данные подтверждают результаты работы [1] о том, что при повышении температуры ионного азотирования до 450°C и выше, помимо S-фазы, в структуре аустенитной нержавеющей стали формируются фазы CrN и α-Fe.

**Заключение.** При ИПО при температуре 400 °C образуется тонкий поверхностный однофазный слой толщиной ≈ 3–4 мкм, состоящий из S-фазы. При повышении температуры ИПО на 150°C значительно увеличивается толщина слоя до 50–60 мкм, однако, образуется гетерофазная структура, состоящая из легированного азотом аустенита Fe-γN, нитрида хрома CrN и ОЦК-железа α-Fe и остаточного аустенита Fe-γ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта 20-38-70031. Авторы благодарны д.т.н. Рамазанову К.Н. за помощь с ионно-плазменной обработкой образцов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borgioli F., Fossati A., Galvanetto E., Bacci T. Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment temperature // Surface and Coatings Technology. – 2005. – Vol. 200. – P. 2474–2480.
2. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.