

Даниил Вадимович Пырин^{1*}, Кевин Чукимарка¹, Егор Анатольевич Бельтюков¹, Дарья Владимировна Расчектаева¹, Аркадий Юрьевич Жилияков^{1,2}, Сергей Владимирович Беликов^{1,2}

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация

²Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

**d.v.pyrin@gmail.com*

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ НА МОДУЛЬ ЮНГА НИКЕЛЕВОГО КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО СПЛАВА

Коррозионностойкие сплавы на основе никеля представляют интерес из-за возможности их применения в различных отраслях промышленности при работе с агрессивными средами, в том числе при высоких температурах. В статье представлены результаты изменения модуля упругости при изотермическом воздействии различной продолжительности в диапазоне температур 350...650 °С. Показано, что в исследуемом сплаве наблюдаются два совместно протекающих процесса: образование упорядоченной фазы и сжатие решетки аустенита.

Ключевые слова: сплав Ni-Cr-Mo, коррозионностойкий сплав, модуль упругости, динамический механический анализ, испытания на микротвердость, упорядоченная фаза, сжатие решетки аустенита

Daniil V. Pyrin, Kevin Chuquimarca, Egor A. Beltyukov, Darya V. Raschektaeva, Arkadiy Yu. Zhilyakov, Sergey V. Belikov

THE EFFECT OF THE STRUCTURAL-PHASE STATE ON THE YOUNG'S MODULUS OF A NICKEL CORROSION-RESISTANT ALLOY

Corrosion-resistant nickel-based alloys are of interest because of the possibility of their application in various industries when working with aggressive environments, including at high temperatures. The article presents the results of changes in the modulus of elasticity under isothermal impact of various durations in the temperature range 350...650 °C. It is shown that two jointly occurring processes are observed in the alloy under study: the formation of an ordered phase and the compression of the austenite lattice.

Keywords: Ni-Cr-Mo alloy, corrosion-resistant alloy, modulus of elasticity, dynamic mechanical analysis, microhardness tests, ordered phase, austenite lattice compression.

Сплавы группы Ni-Cr-Mo перспективны в качестве конструкционного материала для элементов, работающих при повышенных температурах в агрессивных средах, таких как расплавы солей. Материал используется, когда его структура является однофазной и характеризуется равноосными зёрнами

аустенита. Однако такое состояние является метастабильным, и работа при повышенных температурах способна вызвать изменение структуры. Известно, что при температурах 350...650 °С в сплавах этой группы происходят процессы появления областей ближнего и дальнего упорядочения, образования упорядоченной фазы Ni₂(Cr,Mo). При температурах выше 650 °С образуются топологически плотноупакованные фазы типа σ, Р и так далее. В связи с этим следует ожидать изменения свойств материала, что может повлиять, в том числе, и на значения модуля упругости (модуля Юнга).

Целью данной работы было изучение влияния изотермической выдержки при различных температурах в диапазоне 350...650 °С на изменение модуля Юнга коррозионностойкого сплава ХН62М.

Исследуемым материалом был сплав на основе никеля ХН62М. Для измерения модуля упругости образцов сплава в исходном состоянии (обработанном на твердый раствор), а также во время и после изотермических выдержек в диапазоне температур 350...650 °С использовались различные методы: 1) динамический механический анализ (DMA), выполненный на приборе DMA 242 C NETZSCH; 2) измерение контактного модуля упругости по методу Оливера–Фарра на микротвердомере CSM Instruments. Металлографический анализ проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol «JSM-6490 LV» с микроанализирующей насадкой Inka Energy TEM 350. Образование упорядоченной фазы оценивали на просвечивающем электронном микроскопе Jeol «JEM-2100» с микроанализатором InkaEnergyTEM 250. Для выявления изменений периода кристаллической решетки был проведен терморентгенофазовый анализ на дифрактометре Bruker D8 Advance в излучении Kα Co.

Структура образцов сплава в исходном состоянии представлена аустенитными зёрнами без выделенных частиц вторичных фаз. Были исследованы свойства сплава ХН62М на основе никеля, как после изотермического воздействия при высоких температурах, так и в процессе (рис. 1). Измерение модуля Юнга показало, что в образцах, испытанных при комнатной температуре методом индентирования, после 100 часов выдержки в диапазоне температур от 350 до 650 °С (рис. 1,а) наблюдается линейная зависимость с характерным изгибом для образцов, подвергнутых воздействию 550 °С. Заметное увеличение модуля упругости осуществляется в диапазоне температур от 350 до 550 °С, где наибольшее увеличение модуля Юнга достигается при температуре 550 °С, в то время как дальнейшее повышение температуры выдержки приводит к заметному снижению. Аналогичное поведение можно обнаружить при испытаниях на твердость. Однако у образцов, подвергнутых воздействию температуры 650 °С, наблюдается снижение твердости до значений, близких к образцам в исходном состоянии, в то время как снижение модуля Юнга менее выражено.

Из результатов измерения модуля Юнга, выполненных методом DMA (рис. 1,б), видно, что из представленных температур, минимальным изменением модуля Юнга характеризуется температура выдержки в 450 °С. Образец же, подвергнутый воздействию температуры 550 °С, демонстрирует

наибольшее изменение модуля Юнга, а также наибольшую скорость роста упругих характеристик.

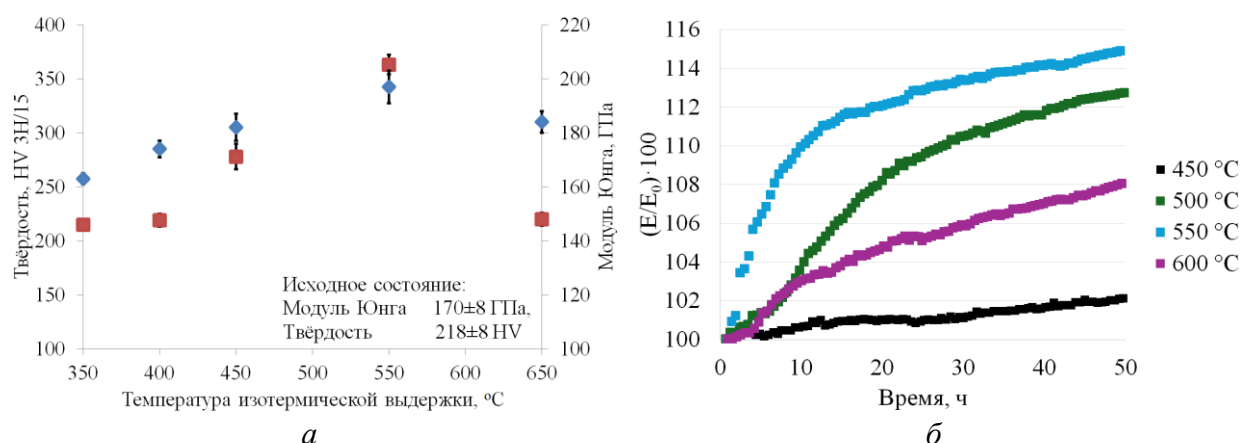


Рис. 1. Изменение свойств сплава XH62M: а – Зависимость модуля Юнга и твёрдости образцов сплава XH62M, выдержанных на протяжении 100 ч при различных температурах; б – Изменение модуля Юнга в процессе изотермической выдержки при различных температурах (метод DMA)

Существующие изменения связаны с протеканием двух сопутствующих процессов: изменением периода решётки аустенита и выделением упорядоченной фазы $Ni_2(Cr,Mo)$. Процесс сжатия аустенита наблюдается при термическом рентгенофазовом анализе (рис. 2). Можно сказать, что сразу после непродолжительного плато (около 4 часов), начинается резкое сжатие решетки аустенита с 3,622 Å до, примерно, 3,616 Å. После 16 часов испытания при температуре 550 °C угол наклона кривой вновь резко меняется, в результате чего дальнейшее уменьшение периода решётки медленно затухает.

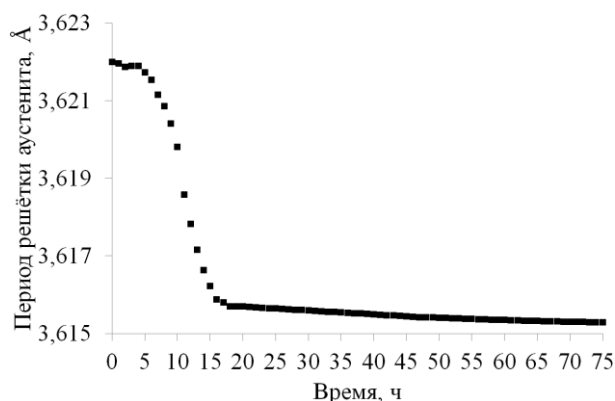


Рис. 2. Изменение периода решетки аустенита при изотермической выдержке при температуре 550°C

Исследование фольг образцов, изотермически обработанных при температурах 450 и 550 °C, показало наличие слабоинтенсивных сверхструктурных рефлексов на электронограммах, которых не было обнаружено после выдержек при температурах 350 и 650 ° (рис. 3).

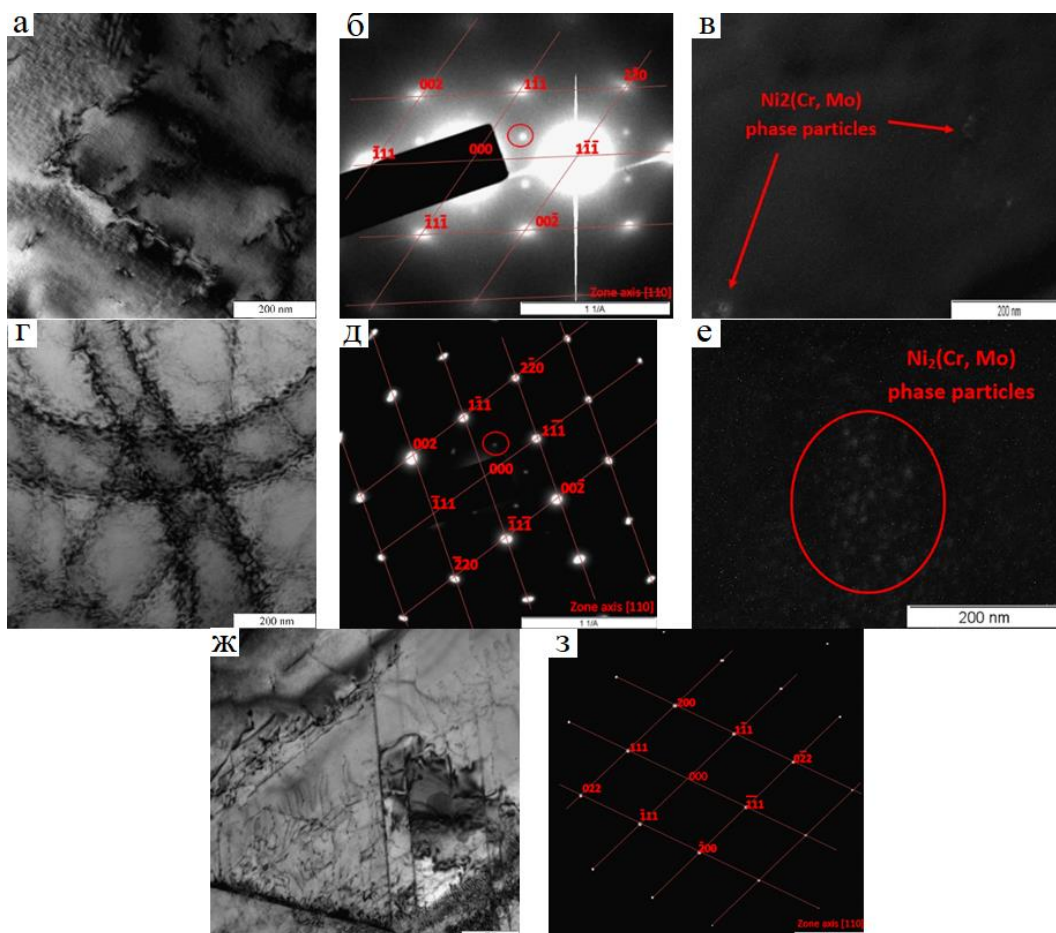


Рис. 3. ПЭМ-изображения в светлом поле (а, г, ж). Соответствующие электронограммы оси зоны [110] с интерпретацией (б, д, з). Изображения в темном поле, снятые с рефлекса $1/3\{220\}$ (в, е) для образцов после температурной обработки при 450°C (а, б, в), 550 °С (г, д, е) и 650 °С (ж, з)

Эти рефлексы идентифицированы как $1/3\{220\}$. Наличие сверхструктурных рефлексов на дифракционной картине от одиночных частиц, представленных в темном поле (рис. 3,в), свидетельствует о том, что упорядоченная фаза $Ni_2(Cr,Mo)$ все еще слабо выражена. Однако наличие этой фазы уже влияет на увеличение модуля упругости. Для образцов, подвергнутых воздействию температуры 550°C, характерна большая объемная доля фазы $Ni_2(Cr,Mo)$ (рис. 3,е). Однако после выдержки при температуре 650°C на электронограммах образцов исчезают сверхструктурные рефлексы (рис. 3,з), которые ранее наблюдались при температурах 450 и 550°C. Это связано с переходом материала при температурах выше 600°C в неупорядоченное состояние.

Основные выводы работы:

- 1) установлено, что изотермическое воздействие в диапазоне температур 350...650°C приводит к увеличению значений модуля Юнга;
- 2) показано, что в исследуемом сплаве за изменение модуля Юнга при изотермической выдержке ответственны два совместно протекающих процесса: образование упорядоченной фазы $Ni_2(Cr,Mo)$ (при температурах 450 и 550 °С) и сжатие решетки аустенита;

3) определено, что при изотермической выдержке 550 °С в течение 75 часов период решетки аустенита изменяется от 3,622 до 3,616 Å, с ярко выраженной, но продолжающейся тенденцией к понижению значений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».