

Научная статья

УДК 621.787.4

Влияние деформации и последующего отжига на формирование градиентной структуры и механические свойства аустенитной коррозионностойкой стали

**Руслан Сергеевич Черниченко¹, Дмитрий Олегович Панов²,
Станислав Валентинович Наумов³, Артур Эдгарович Макаров⁴,
Геннадий Алексеевич Салищев⁵**

^{1,2,3,4,5} Белгородский государственный национальный исследовательский
университет (НИУ «БелГУ»), Лаборатория объемных наноструктурных
материалов, Белгород, Россия

¹ rus.chernichenko@mail.ru,

² panovdmitriy85@gmail.com

Аннотация. Исследована сталь 10X16H13M2 после холодной деформации и последующего отжига. Во время холодной деформации была сформирована градиентная структура, при этом ударная вязкость снижается и достигает насыщения после 40 %. Ударная вязкость отожженной стали осталась прежней. Уровень твердости повышается с увеличением степени деформации, а также после низкотемпературного отжига.

Ключевые слова: аустенитная нержавеющая сталь, деформационная обработка, степень деформации, отжиг, механические свойства, структура, твердость, ударная вязкость, структурный градиент

Благодарности. Исследование профинансировано грантом Российского научного фонда № 20-79-10094. Авторы благодарны сотрудникам объединенного исследовательского центра «Технологии и материалы» Белгородского Государственного национального исследовательского университета за помощь.

Original article

Influence of Deformation and Subsequent Annealing on the Gradient Structure Formation and Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel

**Ruslan S. Chernichenko¹, Dmitry O. Panov², Stanislav V. Naumov³,
Artur E. Makarov⁴, Gennady A. Salishchev⁵**

^{1,2,3,4,5} Belgorod State National Research University (NRU “BelGU”),
Laboratory of Bulk Nanostructured Materials, Belgorod, Russia

¹ rus.chernichenko@mail.ru,

² panovdmitriy85@gmail.com

Abstract. The 10H16N13M2 steel after cold deformation and subsequent annealing was examined. During cold swaging, the gradient structure was developed, while the impact toughness decreased and saturated after 40 %. The impact toughness of the annealed steel remained the same. The hardness level increased with swaging reduction and after low-temperature annealing.

Keywords: austenitic stainless steel, swaging, annealing, mechanical properties, hardness, impact toughness, gradient structure

Acknowledgments. The research was funded by the grant of the Russian science foundation No. 20-79-10094. The authors are grateful to the staff of the joint research center “Technologies and materials” of the Belgorod State National Research university for their help.

Аустенитные нержавеющие стали широко применяются в различных отраслях промышленности. Известно, что главным недостатком сталей аустенитного типа является сравнительно низкий предел текучести. Анализ литературы показал, что одним из перспективных способов повышения механических свойств стали может быть обработка, заключающаяся в деформации и последующем отжиге [1]. Таким образом, целью данной работы является определение влияния режимов деформационно-термической обработки на структуру и механические свойства стали 10X16N13M2.

В качестве исследуемого материала использовалась сталь следующего химического состава: 16,82 вес. %Cr; 12,04 вес. %Ni; 1,91 вес. %Mo; 0,1 вес. %C; 0,002 вес. % P; 0,002 вес. %S; 69,12 вес. %Fe. Материал был

.....

в виде прутка диаметром 46 мм. В качестве исходного было принято состояние послековки и последующего нагрева до 1050 °С с выдержкой 2 ч и закалкой в воде. Далее материал был подвержен радиальной ковке до различных степеней деформации (от 20 до 95 %). Состояние, деформированное до 95 % подвергалось последующему отжигу в диапазоне температур 400–900 °С с выдержкой в течение 2 ч и охлаждением на воздухе.

Структура стали в исходном состоянии представлена в виде ревностных бездефектных зерен со средним размером 55 мкм. Внутри зерен зафиксировано наличие двойников отжига и единичных дислокаций. Деформационная обработка стали на начальных этапах привела к интенсивному двойникованию по одной системе в пределах аустенитного зерна и формированию дислокационных ячеек в центральной части прутка. В центре прутка наблюдаются единичные двойники деформации. На краю формируются пакеты двойников, в результате чего проявляется структурный градиент по сечению прутка.

Повышение степени деформации до 95 % включительно инициирует двойникование материала центра прутка по нескольким системам двойникования. В результате пересечения двойников различных систем формируется блочная структура в центральной части прутка. Край прутка в свою очередь представлен ячеистой структурой, сформированной в результате фрагментации ламелей за счет поперечных дислокационных границ.

Проведение испытаний на динамический трехточечный изгиб показало, что с повышением степени деформации до 40 % показатели ударной вязкости (KCV) снижаются с 2,33 до 1,3 МДж/м². Дальнейшее повышение степени деформации до 95 % включительно не приводит к изменению показателей KCV. Таким образом уровень показателей KCV стабилизируется. Данное поведение материала является результатом формирования структурного градиента [1]. Стоит отметить, что максимальные напряжения при этом повышаются на каждом этапе деформационной обработки.

Наличие структурного градиента оказывает влияние на изменения показателей твердости по сечению прутка. В недеформированном состоянии твердость находится на одном уровне по сечению. С увеличением степени деформации уровень твердости повышается. При этом сохраняется неоднородность распределения твердости по сечению.

Проведение отжига сильнодеформированного состояния в диапазоне температур 500–900 °С приводит к постепенной рекристаллизации деформированной структуры. Объемная доля деформированных областей с повышением температуры отжига снижается. Также снижается плотность дислокаций и дефектов. С повышением температуры отжига увеличивается средний размер рекристаллизованного зерна. При этом увеличивается плотность двойников отжига. Средний размер зерна по сечению прутка увеличивается от края к центру.

Испытания образцов, отожженных в диапазоне температур 400–700 °С на динамический трехточечный изгиб, показали, что значения KCV с повышением температуры отжига остаются на уровне ~1–1,1 МДж/м². Показатели динамической прочности также остаются стабильными для режимов термообработки с интервалом температур 400–700 °С.

Характер профиля распределения твердости по сечению после отжига в интервале температур 400–700 °С не меняется. Отжиг в интервале температур 800–900 °С приводит к выравниванию твердости по сечению прутка.

Данное поведение, скорее всего, связано с наличием регионов с различным размером зерна, что подтверждается исследованием структуры посредством СЭМ. Повышение температуры отжига приводит к постепенному выстраиванию значений твердости на одном уровне. При этом показатель среднего уровня твердости снижается пропорционально повышению температуры отжига, что описывается значительными структурными изменениями в результате рекристаллизации деформированной структуры.

Список источников / References

1. Excellent strength-toughness synergy in metastable austenitic stainless steel due to gradient structure formation / D. O. Panov, R. Chernenchenko, S. Naumov [et al.] // Materials Letters. 2021. Vol. 303.