

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ В МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КОМПЛЕКСА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

*Д. О. Панов, Е. А. Кудрявцев, Р. С. Черниченко, С. В. Наумов, В. В. Миронцов,
Г.А. Салищев*

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, РФ
dimmak-panov@mail.ru

Аннотация. Исследовано влияние радиальнойковки и последующего низкотемпературного отжига на структуру и механические свойства метастабильной аустенитной нержавеющей стали. Показано, что холодная радиальнаяковка с последующим низкотемпературным отжигом приводит к получению повышенной прочности и ударной вязкости, что обусловлено формированием градиентной структуры.

Введение

Метастабильные аустенитные стали (МАС) имеют высокую пластичность, ударную вязкость и коррозионную стойкость. В то же время МАС имеют довольно низкий предел текучести [1]. Формирование градиентной структуры позволяет повысить прочностные характеристики без потери характеристик надежности [2,3]. Градиентная структура в образцах относительно малых размеров может быть получена, например, деформацией кручением [2] или поверхностной деформацией [3]. Однако градиентная структура в относительно крупных заготовках может быть получена методом радиальнойковки [4]. В то же время последеформационный отжиг МАС при температурах несколько ниже начала обратного мартенситного превращения может сопровождаться дополнительным измельчением структуры и упрочнением, например, в результате частичной полигонизации [5]. Следует отметить, что пока неясно как низкотемпературный отжиг влияет на свойства МАС. Таким образом, данная работа посвящена исследованию влияния низкотемпературного отжига на структуру и механические свойства метастабильной аустенитной нержавеющей стали после холодной радиальнойковки.

Материал и методики

В работе исследовали метастабильную аустенитную сталь 08X18H10T. Предварительно горячекатаный пруток был подвергнут закалке в воде с температуры 1050 °С. Затем пруток был деформирован

на радиально-ковочной машине SXP-16 от $\varnothing 33,0$ до $\varnothing 11,5$ мм, что соответствует общей деформации 90 %. Последующий отжиг прутка проводили при температуре 500 °С в течение 2 часов. Микроструктуру исследовали на электронном микроскопе JEOL JEM-2100 в поперечном сечении относительно оси прутка. Содержание магнитной α -фазы определяли в поперечном сечении с помощью FERRITSCOPE FMP30, который был предварительно откалиброван с использованием стандартных образцов. Испытания на растяжение проводили на электромеханической испытательной машине Instron 5882. Цилиндрические образцы для испытаний на растяжение с диаметром рабочей части 5 мм и длиной 25 мм вырезали из центра прутка. Скорость деформации составляла $1 \cdot 10^{-3}$ мм с⁻¹. Испытания на ударную вязкость проводили на испытательной машине Instron SI-1 М. Образцы для испытаний на КСТ соответствовали ГОСТ 9454-78 – тип 17.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Непосредственно после предварительной закалки исследованной стали с температуры 1050 °С микроструктура состоит из равноосных аустенитных зерен диаметром 10 мкм. Помимо этого, в структуре содержится структурно свободные области δ -феррита. Последующая холодная радиальная ковка (ХРК) со степенью 90% привела к получению преимущественно lamellar аустенито-мартенситной структуры в центре (Рис. 1а) и глобулярной мартенситной на краю прутка (Рис. 1б). Ширины lamell и диаметр глобулей в центре и на краю составляют ~170 нм.

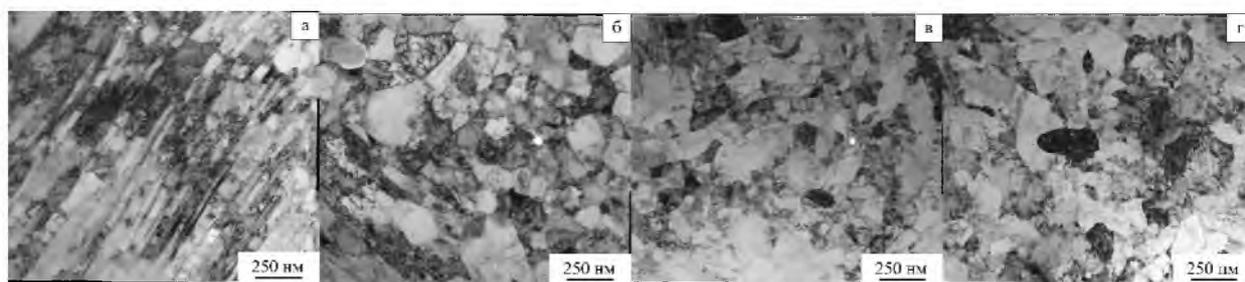


Рисунок 1. Структура исследованной стали после ХРК (а, б) и последующего отжига при 500 °С (в, г): а, в – центр прутка; б, г – край прутка.

Низкотемпературный последеформационный отжиг при 500 °С приводит к частичному развитию полигонизации и рекристаллизации (Рис. 1в и г). Эти процессы сопровождаются измельчением структуры за счет образования дислокационных границ и новых бездефектных

зерен. При этом средний размер зерен/субзерен уменьшился до 110-170 нм в центре и на краю. Частичное обратное мартенситное превращение также вызывает образование речных зародышей ревертированного аустенита внутри альфа-мартенсита. Кроме того, было обнаружено выделение карбидных частиц размером менее 12 нм в пределах областей альфа-мартенсита, что вызвано меньшей растворимостью углерода в альфа-фазе по сравнению с аустенитом.

В исследуемой стали непосредственно перед ХРК ферромагнитный δ -феррит равномерно распределен вдоль диаметра исходного стержня с объемной долей $\sim 2\%$. После ХРК со степенью 90% содержание α -фазы составило 39% и 68% в центре и на краю соответственно. Отжиг при 500 °С сопровождается незначительным уменьшением количества α -фазы из-за частичного развития альфа-гамма превращения [5].

ХРК привела к значительному увеличению прочностных характеристик исследованной стали ($\sigma_{0,2}$ и σ_b около 1400 МПа) и снижению пластичности до $\sim 11\%$). После отжига при 500 °С наблюдалось дополнительное упрочнение примерно на 10%, но при небольшом снижении относительного удлинения. Вероятно, упрочнение после отжига, обусловлено выделением дисперсных карбидных частиц.

В тоже время ХРК снижает ударную вязкость с 158 до 70 Дж/см², что типично для холоднодеформированных МАС [4]. Последующий отжиг привел к удвоению ударной вязкости до 142 Дж/см², что обусловлено разветвлением трещины в направлении оси стержня при испытании.

Заключение

Текущее исследование показало, что холодная радиальная ковка с последующим низкотемпературным отжигом приводит к получению повышенной прочности и ударной вязкости, что обусловлено формированием градиентной структуры по сечению.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Соглашение № 20-79-10094) с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Технологии и Материалы НИУ "БелГУ".

Литература

1. Lo, K. H.; Shek, C. H.; Lai, J. K. L. Recent developments in stainless steels, Mater. Sci. Eng. R Rep. 65 (4-6) (2009) 39–104.

2. Gu, J.; Zhang, L.; Ni, S.; Song, M. Effects of grain size on the microstructures and mechanical properties of 304 austenitic steel processed by torsional deformation, *Micron* 105 (2018) 93–97.
3. Wu, X. L.; Yang, M. X.; Yuan, F. P.; Chen, L.; Zhu, Y. T.; Combining gradient structure and TRIP effect to produce austenite stainless steel with high strength and ductility, *Acta Mater.* 112 (2016) 337–346.
4. Panov, D.; Chernichenko, R.; Kudryavtsev, E.; Klimenko, D.; Naumov, S.; Pertsev, A. Effect of Cold Swaging on the Bulk Gradient Structure Formation and Mechanical Properties of a 316-Type Austenitic Stainless Steel. *Materials* 2022, 15.
5. Panov, D.; Kudryavtsev, E.; Chernichenko, R.; Smirnov, A.; Stepanov, N.; Simonov, Y.; Zharebtsov, S.; Salishchev, G. Mechanisms of the reverse martensite-to-austenite transformation in a metastable austenitic stainless steel, *Metals (Basel)* 11 (2021) 1–13.
6. Panov, D.; Pertsev, A.; Smirnov, A.; Khotinov, V.; Simonov, Y. Metastable austenitic steel structure and mechanical properties evolution in the process of cold radial forging, *Materials* 12 (2019) 2058.