

# ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ МЕТОДОМ ХОЛОДНОЙ РАДИАЛЬНОЙ КОВКИ.

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

Федеральное Государственное Автономное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»), г. Белгород

*\*Email: chernichenko@bsu.edu.ru*

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию влияния обработки методом холодной радиальной ковки на формирование объемной градиентной структуры и механических свойств аустенитной нержавеющей стали 10X16H13M2. В результате исследования микроструктуры выявлено, что деформационная обработка методом холодной радиальной (ХРК) ковки до различных степеней деформации (20–95%) приводит к формированию структурного градиента по сечению прутка. В следствие проведение обработки методом ХРК 40–95% увеличиваются прочностные характеристики материала с незначительным снижением пластичности.

## **Введение**

Аустенитные нержавеющие стали находят разнообразное применение в автомобильной, атомной, медицинской и электронной промышленности благодаря своим превосходным механическим свойствам и высокой технологичности [1-3]. Кроме того, такие стали обладают высокой коррозионной стойкостью и могут использоваться в агрессивных средах и в судостроении [4-5]. Однако общеизвестным недостатком аустенитных сталей является их низкий предел текучести. Наиболее простым методом повышения механических свойств аустенитных нержавеющих сталей является деформационная обработка, что обычно приводит к снижению пластичности [6-8] и ударной вязкости [9]. Однако, проведение обработки, благодаря которой возможно достижение комплекса высокой прочности и пластичности является актуальной и сложной задачей. В работах [10-11] для решения задач подобного рода применяли различные методы обработки, позволяющие получить гетерогенную структуру в материале. А именно, формирование градиентной структуры в меди приводит к повышению прочностных характеристик, при этом характеристики пластичности соответствуют показателям, которые демонстрирует медь с крупнозернистой структурой [10]. В свою очередь создание гетерогенной структуры в стали 316L приводит к удовлетворительному сочетанию прочности и пластичности [11].

Таким образом, формирование градиентной структуры, представленной в виде постепенного изменения фазового состава или размера зерна по сечению заготовки может быть перспективным методом повышения механических свойств аустенитной нержавеющей стали 10X16H13M2. В связи с этим целью данного исследования является определение влияния градиентной структуры, сформированной в результате холодной радиальной ковки, на механические свойства стали 10X16H13M2.

### **Материал и методики**

В качестве исследуемого материала была выбрана сталь 10X16H13M2 следующего химического состава (мас. %): 16.82 % Cr; 12.04 % Ni; 1.91% Mo; 0.1 %C; 0.002 % P; 0.002 % S ост. Fe. Исходный пруток был получен методом горячей радиальной ковки. Затем материал подвергали нагреву до 1050°C с выдержкой в течение 2 часов и последующим охлаждением в воде до температуры окружающей среды. Состояние после отжига и последующей закалки принимали за исходное. Полученный пруток подвергали холодной радиальной ковке при комнатной температуре на радиальной ковочной машине с четырьмя радиально перемещающимися бойками со следующим режимом: скорость подачи заготовки 180 мм/мин, частота ходов 1000 ударов в минуту, скорость вращения заготовки 25 оборотов в минуту. Водяное охлаждение прутка осуществлялось при ковке. Холодная радиальная ковка проводилась до различных степеней деформации: 20%, 40%, 60%, 80% и 95%. Исследование структуры проводилось на поверхности электролитически отполированной тонкой фольги с использованием просвечивающего (ПЭМ) и сканирующего электронных микроскопов (СЭМ). Тонкие заготовки под фольги толщиной 0,3 мм вырезали в поперечном сечении на проволочном электроэрозионном станке Sodick AQ300L. После чего заготовки подвергались шлифовке с двух сторон наждачной бумагой до толщины 120–140 мкм. После чего проводилась двух струйная полировка вырезанных из данных заготовок дисков диаметром 3 мм, с использованием установки для электролитической полировки TenuPol-5. В качестве электролита использовалась смесь хлорной и уксусной кислоты в пропорциях 1:9 соответственно. ПЭМ-исследования проводились с использованием электронного микроскопа JEOL JEM-2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ. СЭМ-исследования проводились на микроскопе FEI Nova NanoSEM

450, оснащенный камерой EDAX Hikari EBSD. Определение микротвердости по Виккерсу проводили на полуавтоматическом твердомере Wolpert 402MVD, оснащенный алмазным наконечником с углом закругления  $136^\circ$ . Измерения проводились по диаметру в поперечном сечении с нагрузкой 200 г и выдержкой 15 с. Испытания на растяжение проводились при комнатной температуре со скоростью деформации  $1 \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1}$  на универсальной испытательной машине Instron 5882 с использованием плоских образцов. Размеры образцов для испытания рассчитывались согласно ГОСТу.

### **Результаты исследований**

Рентгеноструктурный анализ показал, что в исходном состоянии материал имеет однофазную структуру с гранцентрированной кубической решеткой (ГЦК). Структура в исходном состоянии представлена в виде равноосных аустенитных зерен со средним размером зерна равным 54 мкм. Следует отметить наличие внутри зерен равномерно распределенных единичных дислокаций и двойников отжига. Структура однородна по всему сечению прутка.

Деформационная обработка методом холодной радиальнойковки до степени деформации равной 20% (ХРК20%) приводит к формированию в центре прутка дислокационных ячеек неправильной формы размером в несколько микрометров. Кроме того, в структуре обнаружены двойники деформации. Как правило, двойники деформации после ХРК20% представлены в виде двойниковых полос. По результатам исследований выявлено, что механическое двойникование развивалось по нескольким системам. Стоит отметить, что в некоторых случаях двойниковые полосы проходили через несколько зерен, изменяя свое направление при переходе границы зерна. По сравнению с центром, в подповерхностном слое прутка дислокационные ячейки стали более выраженными и дисперсными. Ширина двойниковых полос значительно увеличилась.

Дальнейшее повышение степени деформации до 40–80% приводит к двойникованию по системам, отличным от исходных, в результате чего в центре прутка формируется структура блочного типа. Блоки, образованные двойниками различных систем, имеют форму параллелепипеда. При этом размер дислокационных ячеек уменьшился до 100 нм. В приповерхностных слоях происходит фрагментация lamellarной структуры за счет выстраивания дислокации в поперечные границы.

В результате ХРК 95% блочная структура центральной части прутка фрагментирована дислокационными ячейками. В свою очередь в приповерхностных слоях в lamellarной структуре дислокации выстраиваются в поперечные границы. Однако, можно заметить новые равноостные субзерна размером менее 1 мкм с нанодвойниками внутри.

В исходном состоянии распределение микротвердости по сечению прутка однородно - на уровне 150–160 HV. ХРК 20% приводит к увеличению твердости до 250 HV. При этом по направлению от центра к краю прутка зафиксировано повышение твердости до 280–300 HV. Дальнейшее увеличение степени деформации до 40–80% вызывает рост общего уровня микротвердости. При этом распределение твердости по сечению прутка неоднородно в результате формирования структурного градиента. Максимальные значения твердости зафиксированы на половине радиуса. Однако, в результате ХРК 95% максимальные значения твердости зафиксированы в центре и в подповерхностном слое прутка (порядка 380 HV).

Проведение испытаний на растяжение показали, что в исходном состоянии кривая напряжение-деформация демонстрирует типичное для отожжённого состояния поведение с высокими характеристиками пластичности. ХРК 20% приводит к значительному снижению равномерного удлинения с 53% в исходном состоянии до 10% после ХРК 20%. При этом значительно увеличиваются прочностные характеристики стали, а именно предел текучести ( $\sigma_{0.2}$ ) увеличивается с 250 до 720 МПа, тогда как предел прочности ( $\sigma_B$ ) повышается с 630 до 810 МПа. Дальнейшее увеличение степени деформации до 40% приводит к резкому снижению характеристик пластичности, равномерное удлинение снижается до 3,3% для ХРК 40%. При этом  $\sigma_{0.2}$  и  $\sigma_B$  в результате ХРК 40% увеличиваются до 740 и 925 МПа соответственно. Стоит отметить, что дальнейшее повышение степени деформации, вплоть до 95%, не приводит к значительному снижению характеристик пластичности, при этом происходит дальнейший рост прочностных характеристик. Таким образом, в результате ХРК 95% равномерное удлинение составляет 2%, тогда как предел прочности составляет 1220 МПа, а предел текучести 1050 МПа.

### **Выводы**

Деформационная обработка методом холодной радиальнойковки до различных степеней приводит к формированию структурного

градиента по сечению прутка в следствии отличия механизмов деформации в центре и приповерхностных слоях. Наличие градиента оказывает значительное влияние на механические свойства исследуемой стали. ХРК 20% включительно приводит к значительному упрочнению материала, наряду со снижением характеристик пластичности. Однако дальнейшее повышение степени деформации 40–80% приводит к стабилизации пластичности на одном уровне, при этом прочность материала продолжает увеличиваться. В свою очередь ХРК 95% приводит к снижению пластичности и повышению прочности, исследуемой стали.

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

#### Литература

1. Jia, S.; Tan, Q.; Ye, J.; Zhu, Z.; Jiang, Z. Experiments on dynamic mechanical properties of austenitic stainless steel S30408 and S31608, *Journal of Constructional Steel Research*. 2021, 179, 106556.
2. Chen, J., Wei, H., Zhang, X., Peng, Y., Kong, J., & Wang, K., Flow behavior and microstructure evolution during dynamic deformation of 316 L stainless steel fabricated by wire and arc additive manufacturing, *Materials and Design*, 2020, 198, 109325
3. Lo, K.H., Shek, C.H. and Lai, J.K.L., Recent Developments in Stainless Steels. *Materials Science and Engineering R*, 2009, 65, pp. 39–104.
4. Szubzda B., Antończak A., Koziol P., Lazarek L., Stepak B., Lecka K., Szmaja A and Ozimek M., Corrosion resistance of the AISI 304, 316 and 321 stainless steel surfaces modified by laser. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 113, 012017
5. Gallardo-Gonzalez J., Martínez M., Barreneche C., Fernandez A. I., Liu M., Tay N.H. S, Bruno F and Segarra M., Corrosion of AISI316 as containment material for latent heat thermal energy storage systems based on carbonates. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018 186, pp. 1–8
6. Shakhova, I.; Dudko, V.; Belyakov, A.; Tsuzaki, K.; Kaibyshev, R. Effect of large strain cold rolling and subsequent annealing on microstructure and mechanical properties of an austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A* 2012, 545, 176–186.
7. Ueno, H.; Kakihata, K.; Kaneko, Y.; Hashimoto, S.; Vinogradov, A. Enhanced fatigue properties of nanostructured austenitic SUS 316L stainless steel. *Acta Materialia*, 2011, 59, 7060–7069.
8. Üçok, I.; Ando, T.; Grant, N.J. Property enhancement in Type 316L stainless steel by spray forming. *Materials Science and Engineering: A* 1991, 133, 284–287.
9. 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*, 2019, 12, 2058.
10. Fang, T.H.; Li, W.L.; Tao, N.R.; Lu, K. Revealing extraordinary intrinsic tensile plasticity in gradient nano-grained copper. *Science*, 2011, 331, 1587–1590.
11. Li, J.; Gao, B.; Huang, Z.; Zhou, H.; Mao, Q.; Li, Y. Design for strength-ductility synergy of 316L stainless steel with heterogeneous lamella structure through medium cold rolling and annealing, *Vacuum*, 2018, 157, 128–135.