

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТОЙ СТАЛИ AISI410

ЛИ ЛИНМО<sup>1</sup>, Е ЯНЬСУН<sup>1,2</sup>, О.Ю. ВАУЛИНА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Шеньянский политехнический университет

**Введение.** Термическая обработка является важным процессом для улучшения механических свойств стали. Термическая обработка оказывает существенное влияние на структуру металла, в частности, на его кристаллическую решетку. В процессе обработки происходят изменения, которые могут значительно повысить прочность и твердость стали. Существует несколько основных видов термической обработки, каждый из которых направлен на достижение определенных целей.

При проведении термической обработки необходимо учитывать не только желаемые свойства стали, но и специфику конкретного материала. Также важно правильно подобрать режим обработки, чтобы избежать нежелательных изменений в структуре материала. Контроль параметров обработки и последующая термообработка играют ключевую роль в достижении оптимальных результатов.

**Цель работы** является подбор режимов термической обработки стали AISI 410, а также исследование структуры и свойств данной стали после обработки.

**Материал и методы исследования.** Сталь AISI 410 - это мартенситная нержавеющая сталь [1] с добавлением от 11,5 % до 13,5 % хрома, таблица 1. Сталь AISI 410 обладает хорошей стойкостью к высокотемпературному окислению и локальной коррозии, а также позволяет получить необходимые свойства путем термообработки, часто используется в производстве коррозионностойких механических деталей и т. д.

Таблица 1 – Химический состав стали AISI 410

Химический элемент	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Fe
Содержание, %	0,15	1,0	0,045	0,03	1,0	13	0,6	остальное

Для термической обработки (диффузионный отжиг и закалка) использовали муфельные печи UED-7-12. Металлографический анализ проводили на оптическом металлографическом инвертированном микроскопе Лабомет-И [1]. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3.

**Результаты исследования.** Травленная поверхность исходных образцов (в состоянии поставки) представлена на рисунке 1.

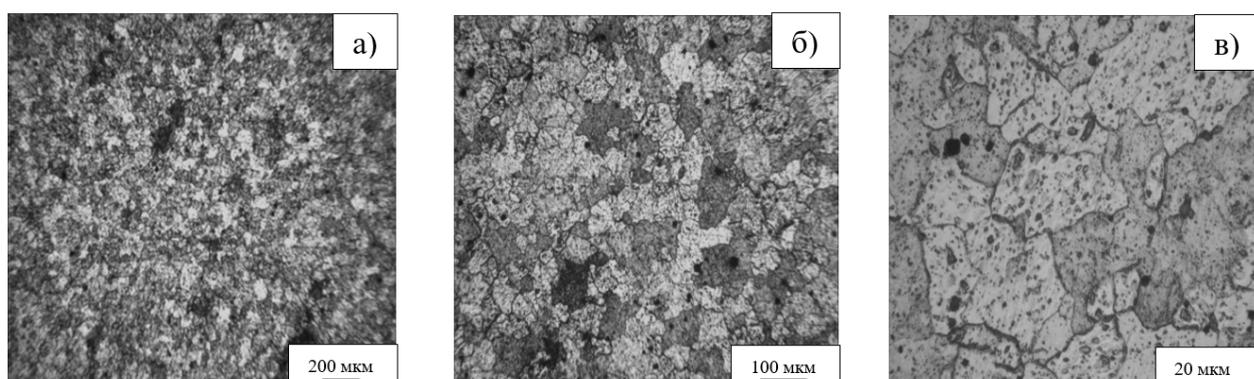


Рисунок 1 – Микроструктура исходных образцов стали AISI 410: а–в) разные места и увеличения

При содержании в исследуемой стали 13 % хрома эвтектоидное содержание углерода снижается до 0,38 %. Однако сталь AISI 410, имея в своем составе 0,15 % углерода, остается доэвтектоидной. Исходя из этого, в равновесном состоянии данная сталь должна состоять из феррита и небольшого количества перлита. Часть хрома и марганца, таблица 1, израсходуется на легирование цементита, а остальная часть этих элементов пойдут на легирование феррита. В связи с изменением состава феррита и цементита изменяется состав эвтектоида в сторону меньших концентраций углерода, следовательно, в структуре стали AISI 410 количество перлита увеличивается по сравнению с нелегированной сталью. Средний размер зерен  $40,5 \pm 15,17$  мкм, соотношение феррита к перлиту – 90 % /10 %.

Далее образцы подвергались диффузионному отжигу (температура отжига 1050 °С, выдержка – 20 минут, охлаждение – в печи). Микроструктура поверхности показана на рисунке 2.

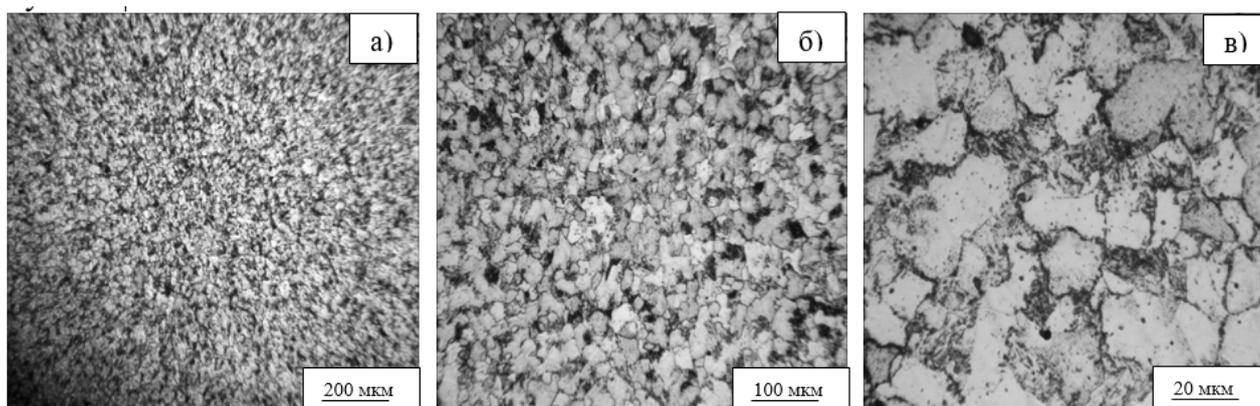


Рисунок 2 – Микроструктура стали AISI 410 после диффузионного отжига:  
а–в) разные места и увеличения

После отжига структура стала более равномерной, равноосной. В процессе высокотемпературного отжига происходит растворение частиц карбидной фазы (первичных карбидов). Структура стали сохранилась смесь высокохромистого феррита и перлита (состава легированного хромом феррита и карбида). Средний размер зерен  $33,67 \pm 14,23$  мкм, соотношение феррита к перлиту – 75 % /25 %.

После диффузионного отжига была проведена закалка. Режим закалки: температура 1020 °С, выдержка – 20 минут, охлаждение – масло. Микроструктура представлена на рисунке 3.

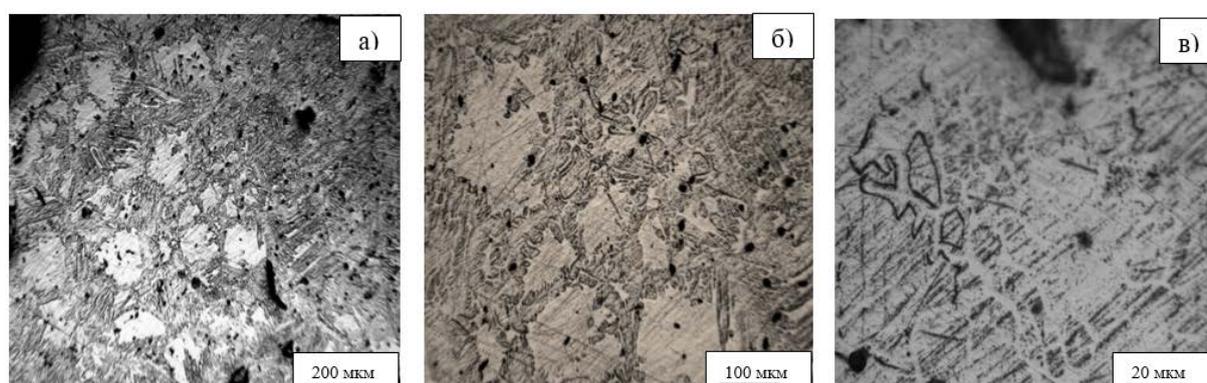


Рисунок 3 - Микроструктура стали AISI 410 после закалки:  
а–в) разные места и увеличения

Охлаждение из аустенитной области фиксирует в стали мартенситную структуру. В зависимости от температуры нагрева под закалку и состава стали, в ней может присутствовать

некоторое количество частиц карбидов, феррита, либо остаточного аустенита. Таким образом после закалки наблюдается структура, состоящая из игл мартенсита с карбидами и остаточный аустенит. Выбранный режим не удачный, т.к. наблюдаются достаточно крупные области ( $\sim 120 \pm 23$  мкм) остаточного аустенита. За счет увеличения скорости растворения карбидов достигается и возрастает концентрация аустенитообразующих элементов (углерода [2, 3]) в структуре стали AISI 410 при температуре нагрева под закалку свыше  $1000^\circ\text{C}$ , что способствует формированию остаточного аустенита и увеличению его количества. Следовательно, температуру под закалку стоит уменьшить.

Наиболее часто для оценки механических свойств сталей используют измерения твердости, так как она коррелирует с прочностью. Результаты измерения микротвердости представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значение микротвёрдости

Тип образца	Микротвердость, МПа	Изменения микротвёрдости относительно исходного образца, %
До термообработки	121,0±7,3	-
После диффузионного отжига	168,9±12,3	↑30
После закалки	346,6±41,9	↑186

Из таблицы 1 видно, что микротвердость увеличилась относительно микротвердости образцов до термообработки. Увеличение микротвердости после диффузионного отжига можно объяснить небольшим уменьшением размера зерен, а также увеличением зерен перлита. Известно, что упрочнение при закалке сталей на мартенсит обусловлено действием нескольких факторов, и прежде всего присутствия углерода в твердом растворе. После выдержки при  $800^\circ\text{C}$  [4] и закалки в масло сталь имеет структуру, состоящую из феррита и мелкодисперсных легированных карбидов, и характеризуется минимальной твердостью. Повышение температуры нагрева под закалку до температуры  $1020^\circ\text{C}$  приводит к частичному растворению карбидов и фиксации при закалке в стали мартенситной структуры [4]. С ростом температуры аустенитизации за счет ускорения растворения карбидов происходит прирост твердости закаленной на мартенсит стали. Это связано со значительным увеличением степени тетрагональности (с/а) кристаллической решетки мартенсита [3].

Таким образом, можно сделать следующие выводы. После диффузионного отжига структура сохранилась в виде легированных феррита и перлита, зерна уменьшились на 17 %. После закалки структура стали AISI 410 состоит из игл мартенсита с карбидами и остаточного аустенита. Микротвердость повысилась после диффузионного отжига на 30 %, а после закалки на 186 %.

*В работе применялось оборудование ЦКП НОИЦ НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710».*

### Список литературы

1. Vaulina O.Y., Darenskaia E.A., Myachin Y.V., et al. Influence of mechanical activation of steel powder on its properties[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2017, 175(1): 012038
2. Garcia de Andrés C., Álvarez L.F., López V. Effects of carbide-forming elements on the response to thermal treatment of the X45Cr13 martensitic stainless steel. Journal of Materials Science. 1998; 33: 4095-4100. <https://doi.org/10.1023/A:1004424329556>
3. Гринберг Е.М., Гончаров С.С., Мова Д.А., Кондаурова Е.Ю., Суровцева Е.А. Влияние скорости охлаждения при закалке на структуру и твердость сталей типа X13 с различным содержанием углерода. Известия ТулГУ. Технические науки. 2009; (3): 1-11.
4. Ивашко В.В. Исследование влияния режимов нагрева на структуру и свойства нержавеющей стали 20X13. Вестник БарГУ. Серия: Технические науки. 2015; (3): 45-48.