

УДК 621.91.01

**ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ В  
ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЗАГОТОВКИ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ**

Нгуен В.Д., аспирант кафедры машиностроения  
Научный руководитель: Максаров В.В., д.т.н., профессор, декан ММФ  
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II  
г. Санкт-Петербург

Криогенная обработка основана на применении криогенных сред, таких как жидкий азот (LN) с температурой  $-196^{\circ}\text{C}$  или углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) с температурой  $-78^{\circ}\text{C}$ . Благодаря своим уникальным свойствам, таким как интенсивное охлаждение, экологическая безопасность и универсальность, криогенная обработка становится все более популярной в различных отраслях промышленности. Жидкий азот, благодаря своей крайне низкой температуре, является наиболее предпочтительной средой для криогенной обработки, обеспечивая высокое качество и долговечность обрабатываемых материалов. Технология по криогенной обработке была реализована только в первые годы 20-го века, но на самом деле только в последние годы 20-го века эта область нашла особое внимание. В мире в области металлургии и машиностроения опубликован ряд исследовательских проектов в этой области, но до сих пор их немного.

С целью улучшения свойств стали была исследована и приведена термическая обработка, включающая нагрев стали до температуры аустенитизации и быстрое ее охлаждение с получением мартенситной структуры, представляющей собой пересыщенный твердый раствор углерода С в  $\alpha$ -железе. Мартенситное превращение наблюдается в различных материалах, в т.ч. углеродсодержащих легированных, безуглеродистых легированных сталях, а также в других легированных сталях и сплавах. Данный процесс инициируется при достижении определенной температуры, известной как температура начала мартенситного превращения ( $M_n$ ). В большинстве материалов мартенситное превращение носит изотермический характер и протекает постепенно до достижения температуры окончания мартенситного превращения ( $M_k$ ) [1]. Температуры  $M_n$  и  $M_k$  являются характерными показателями и могут быть определены по данным, приведенным в специализированной литературе по термической обработке. Зависимость температур  $M_n$  и  $M_k$  от содержания углерода (%C) в углеродистой стали иллюстрируется на рисунке 1.

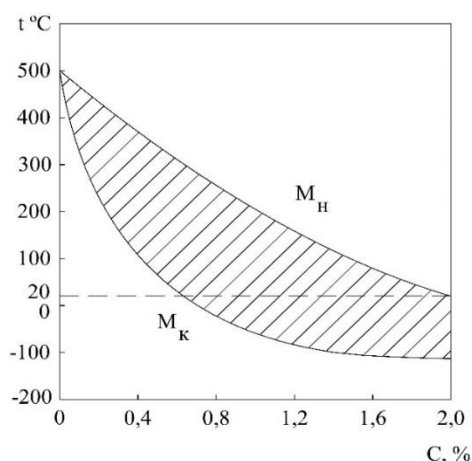


Рисунок 1. Влияние углерода (C, %) на температуру ( $t$ , °C) начала и конца мартенситного превращения [1]

Температура начала  $M_n$  и температура окончания мартенситное превращения  $M_k$  под влиянием содержания углерода в стали могут быть достигнуты к низким температурам (ниже чем комнатную температуру – 25°C). В зависимости от состав содержащих в сталях легированных элементов, температуры закалки, скорость охлаждения и т.п. происходит превращение части аустенита в мартенсит. При выдержке стали при комнатной температуре или нагреве до температуры отпуска остаточный аустенит стабилизируется, что затрудняет его дальнейшее превращение в мартенсит. Под нагрузкой он может трансформироваться в мартенсит, вызывая разрушение. Для предотвращения этого явления остаточный аустенит преобразуют в мартенсит отпуском, криогенной обработкой или их комбинацией. В углеродистых и низколегированных сталях остаточный аустенит неустойчив при 25°C и может медленно изменяться по времени. Для изделий, требующих высокой точности, может привести к изменениям размеров из-за изменения размеров решетки различных фаз. Стабилизация размеров достигается повторной криогенной обработкой.

Известно, что при охлаждении до определенных низких температур в высокоуглеродистых и легированных конструкционных сталях часть остаточного аустенита в структуре стали, преобразует в мартенсит. Этот процесс обусловлен закономерностью распада остаточного аустенита при понижении температуры вплоть до достижения нижней мартенситной точки ( $M_k$ ) [1]. При этом углерод оказывает значительное влияние на снижение температур начала ( $M_n$ ) и конца ( $M_k$ ) мартенситного превращения, при этом завершение превращения может происходить при температурах до –180°C.

Для высоколегированных или углеродистых сталей криогенная обработка является этапом процесса термообработки. Этот процесс проводится в диапазоне температур от -70°C до -120°C для преобразования остаточного аустенита в мартенсит. Таким образом, процесс криогенной обработки имеет следующие эффекты:

- Повышает стабильность размеров изделия во время работы (за счет отсутствия фазового перехода)

– Повышает твердость стали за счет значительно увеличенной доли мартенсита в структуре материала.

Основными легирующими элементами в аустенитных сталях выступают хром и никель. Присутствие никеля в концентрации 9–12 % обеспечивает переход стали в аустенитный класс за счет снижения температуры начала мартенситного превращения ( $M_n$ ) до отрицательных значений [2]. Для оценки структуры стали заданного химического состава после быстрого охлаждения от температур растворения карбонитридов хрома до комнатной температуры широко применяется диаграмма Шеффлера, в соответствии пересечением координат никелевого  $Ni_{экр.}$  и хромового  $Cr_{экр.}$  эквивалентов, которые рассчитываются по формулам (концентрация элементов дана в масс, %):

$$Ni_{экр.} = \% Ni + \% Co + 0,5 \cdot \% Mn + 0,3 \cdot \% C + 30 \cdot \% C + 25 \cdot \% N;$$

$$Cr_{экр.} = \% Cr + 2 \cdot \% Si + 1,5 \cdot \% Mo + 5 \cdot \% V + 5,5 \cdot \% Al + 1,75 \cdot \% Nb + 1,5 \cdot \% Ti + 0,75 \cdot \% W$$

Была использована наиболее распространенная структурная диаграмма А. Шеффлера, представленная на рисунке 2.

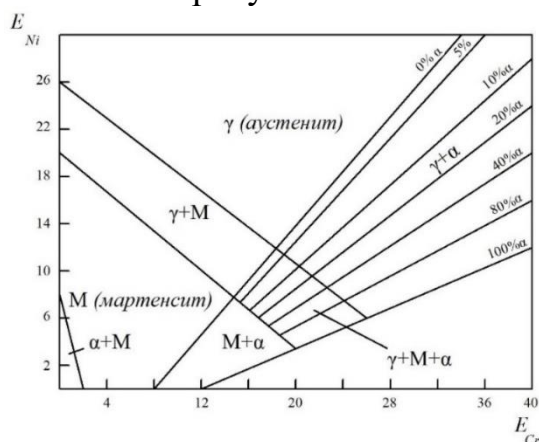


Рисунок 2 – Структурная диаграмма А. Шеффлера [3]

Никелевый эквивалент включает все аустенитообразующие элементы, расширяющие область существования аустенита, а хромовый эквивалент включает ферритообразующие элементы, сужающие область образования аустенита. Пересечение подсчитанных координат  $Ni_{экр.}$  и  $Cr_{экр.}$  дает оценку структуры стали.

Наличие аустенита в материале приводит к межатомным смещениям при воздействии низких температур, что сопровождается перегруппировкой атомов из одной аллотропической формы в другую, что вызывает возникновение высоконапряженного состояния в зоне криогенного воздействия. Стали, имеющие структуру  $\alpha$ -фазы, структуру мартенсита ( $M$ ), а также комбинированные структуры  $\alpha + M$  и  $M + \alpha$ , не подвергаются структурным изменениям при криогенной обработке [3].

Хромоникелевые аустенитные нержавеющие стали сохраняют хорошую пластичность и ударную вязкость и при криогенных температурах, поэтому низкотемпературное воздействие для частичного распада аустенита с образованием мартенситной фазы необходимо проводить при температуре

жидкого азота  $-196^{\circ}\text{C}$ . При воздействии такой температуры в структуре аустенитной стали происходит частичное  $\gamma \rightarrow \alpha$  – превращение с образованием микро-областей мартенсита в аустенитной матрице, прежде всего на участках с повышенными дефектами структуры, что приводит в результате изменения объема кристаллической решетки к возникновению внутренних микронапряжений и изменению свойств в зоне воздействия [4].

### Список литературы

1. Плюснин Е.С., Ащенко М.А. Влияние криогенной обработки на количество остаточного аустенита в инструментальных сталях // Общество. Наука. Инновации. (НПК-2023): Сборник материалов XXIII Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, приуроченной к 60-летию ВятГУ. В 2-х томах, Киров, 12–22 июня 2023 года. Том 2. – Киров: Вятский государственный университет, 2023, с. 203-207. – EDN XHWZGK.
2. Jin-Seob Kim, Jin-Kyung Kim, Martensitic-transformation-driven strain softening in the cryogenic deformation of austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 923, 2025, 147681, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147681>.
3. Костина М.В., Ригина Л.Г., Кудряшов А.Э. и др. Фазовые превращения в азотсодержащих сталях на основе 13% Cr // Металлы, 2024, № 2, с. 52-63. DOI 10.31857/S0869573324025263.
4. Максаров В.В., Нгуен В.Д., Халимоненко В.Д., Шишкин П.В. Технологическое обеспечение качества поверхности заготовки на основе локального криогенного воздействия при обработке аустенитных сталей. *Черные металлы*, 2024, № 9, с. 82-87. DOI: 10.17580/chm.2024.09.13.