



ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 45ХН2МФА

Очилов Элбек 1[0009-0000-9506-9614], Эгамбердиев Илхом 2[0000-0002-7549-2156],
Саибов Маруф 3[0009-0006-5577-2624], Хамроев Нурбек 4[0000-0002-0471-5009]

¹Навоийский государственный горно-технологический университет, ассистент
²Навоийский государственный горно-технологический университет, д.т.н., профессор
^{3,4}Навоийский государственный горно-технологический университет, докторант

Аннотация. Процессы термической обработки постоянно совершенствуются с развитием технологий, который направлен на улучшения физико-механических свойств сталей. В данной работе исследуется влияние различных режимов термической и термомеханической обработки на свойства стали 45ХН2МФА. На основе расчетно-экспериментальных данных и численного моделирования с использованием программных обеспечений JMatPro и Python проведен анализ изменения твердости, прочностных характеристик и фазовых превращений. Установлено, что режим ВТМО обеспечивает наилучший баланс прочности и пластичности для критически нагруженных роторных и торсионных валов при оптимально рассчитанным скорости охлаждения для получения бейнитной структуры.

Ключевые слова: сталь 45ХН2МФА, термическая обработка, механические свойства, фазовые превращения, бейнит, мартенсит, термомеханическая обработка.

Abstract. Heat treatment processes are continuously improving with the advancement of technology, aiming to enhance the physico-mechanical properties of steels. This study examines the effect of various heat and thermomechanical treatment regimes on the properties of 45KhN2MFA steel. Based on computational-experimental data and numerical modeling using JMatPro and Python software, the changes in hardness, strength characteristics, and phase transformations are analyzed. It has been established that the thermomechanical treatment (TMT) mode provides the best balance of strength and ductility for critically loaded rotor and torsion shafts, with an optimally calculated cooling rate for bainitic structure formation.

Keywords: 45KhN2MFA steel, heat treatment, mechanical properties, phase transformations, bainite, martensite, thermomechanical treatment.

Annotatsiya. Zamonaviy texnologiyalar rivoji bilan birga issiqlik ishlov berish jarayonlari ham doimiy takomillashib bormoqda. Bu jarayonlar po'latlarning fizik-mekanik xususiyatlarini yaxshilashga qaratilgan. Ushbu maqolada 45KhN2MFA po'latiga turli xil issiqlik va termomexanik ishlov berish rejimlarining ta'siri o'rganilgan. JMatPro va Python dasturlaridan foydalanilgan hisob-kitoblar va tajriba natijalari asosida qattiqlik, mustahkamlik ko'satikchilari va fazaviy o'zgarishlar tahlil qilingan. Aniqlanishicha, yuqori haroratli termomexanik ishlov rejimi kritik yuklangan rotor va torsion vallari uchun eng yaxshi mustahkamlik va plastiklik muvozanatini ta'minlaydi, bunda beynit strukturasini hosil qilish uchun optimal sovitish tezligi hisoblab chiqilgan.

Kalit so'zlar: 45KhN2MFA po'lati, issiqlik ishlov berish, mexanik xususiyatlar, fazaviy o'zgarishlar, beynit, martensit, termomexanik ishlov.

Введение

Термическая обработка является ключевым технологическим процессом, направленным на изменение структуры и улучшение физико-механических свойств металлов и сплавов. Сталь 45ХН2МФА, относящаяся к категории конструкционных легированных сталей, отличается высоким уровнем прочности, твердости и пластичности, что делает её востребованной в различных отраслях машиностроения. Цель данной работы — анализ влияния различных режимов термической обработки на свойства данной стали с использованием данных из научных публикаций и экспериментальных исследований.



Обзор литературы

Анализ научных источников позволил выделить ряд работ, посвященных исследованию режимов термической обработки стали 45ХН2МФА и их влиянию на структуру и свойства материала. Иголкин А.Ф., Андреев А.К. и др. исследовали влияние термообработки на упругие свойства и хладостойкость стали 45ХН2МФА. Были рассмотрены режимы: закалка и отпуск; двойная закалка и отпуск; высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО) и отпуск под напряжением. Установлено, что максимальное сопротивление пластическим деформациям и минимальная остаточная деформация достигаются при отпуске под напряжением при 300°C. Авторы [1,2] изучили микроструктуру карбидной фазы после различных видов обработки с помощью электронной микроскопии. Наиболее дисперсная структура карбидов получена после отпуска под напряжением, что связано с увеличением числа центров зарождения карбидной фазы в зонах активной релаксации напряжений [3,4]. Также было показано, что после двойной закалки наблюдается охрупчивание стали, а ВТМО даёт наилучшие механические характеристики, включая ударную вязкость ($KV = 14$ Дж) и трещиностойкость ($KIC = 53$ Мпа/м²) [5-6].

Материалы и методы

В работе рассмотрены данные из исследования "Влияние режима термической обработки на упругие свойства и хладостойкость хромоникельмolibденовой стали" [7-8]. Объектом исследования являются торсионные валы из стали 45ХН2МФА, подвергаемые различным режимам термической обработки. Использовались цилиндрические образцы диаметром 20 мм и длиной 35 мм.

Процесс термических обработок состоял из 4 вариантов: 1) закалка и отпуск; 2) двойная закалка и отпуск; 3) высокотемпературная термомеханическая обработка и отпуск; 4) закалка и отпуск под напряжением.

Таблица 1.

Параметры термических обработок

Название термической обработки		Температура нагрева	Среда охлаждения	Нагрузка
1	Закалка	860 °C	Масло	
	Отпуск	150-600°C		
2	Закалка	860°C	Масло	
	Отпуск	200°C		
	Закалка	860°C		
	Отпуск	200°C		
3	Закалка	860-1100°C	Масло	Деформация кручением
	Отпуск	200-400°C		
4	Закалка	860°C	Масло	Крутящий момент
	Отпуск	200-400°C		

Наилучшие показатели для торсионных валов и роторных валов является метод ВТМО образца, которого нагревали до температур 860-1100 °C, после нагрева образца подвергали кручению на различные углы с последующим охлаждением в масляной среде. Отпуск проводили в диапазоне от 200-400°C, после этого подвергали кручению равный 0,7-0,8 Н*м.



Расчетные части осуществлялись на базе JmatPro с использованием таких модулей как: 1) Phase transformation (фазовые преобразования); 2) Thermodynamics properties (термодинамические свойства); 3) Mechanical properties (механические свойства); 4) Flow stress analysis (анализ течения напряжения). Метод расчета в данной платформе производится на основе CALPHAD (calculation of phase diagrams). Для дополнительного расчета образования бейнита были использованы модули языка программирования Python: 1) numpy; 2) matplotlib.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлен график, демонстрирующий данные о прокаливаемости стали по испытанию Джомини. В зоне 0-2 см наблюдается высокая твердость (60-58 HRC) и прочность, что свидетельствует о формировании мартенсита, но при этом материал становится хрупким. В диапазоне 3-6 см твердость снижается до 52 HRC, появляются бейнитные структуры, обеспечивающие баланс прочности и пластичности. После 6 см твердость падает до 47-49 HRC, что связано с формированием перлитно-ферритной структуры, обеспечивающей лучшую пластичность.

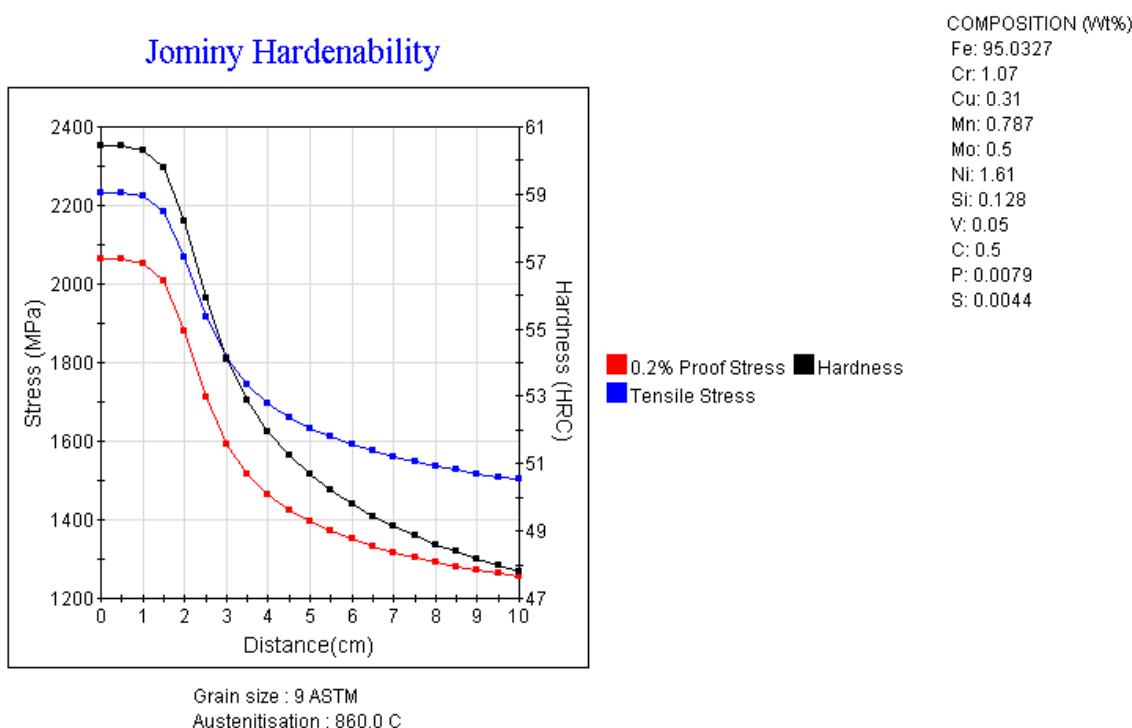


Рис.1. График прокаливаемости стали по испытанию Джомини.

Черная кривая на рисунке 1, указывает на рост содержания мартенсита ближе к охлажденному торцу, в то время как бейнит и перлит увеличиваются на более удаленных участках. Высокое содержание хрома (1.07%), молибдена (0.5%) и никеля (1.61%) повышает прокаливаемость стали, обеспечивая образование твердых структур на большем расстоянии.

Анализ механических свойств показывает, что максимальная твердость и прочность наблюдаются ближе к закаливаемому торцу, в то время как на удаленных участках материал становится более пластичным из-за формирования бейнитно-перлитной структуры.

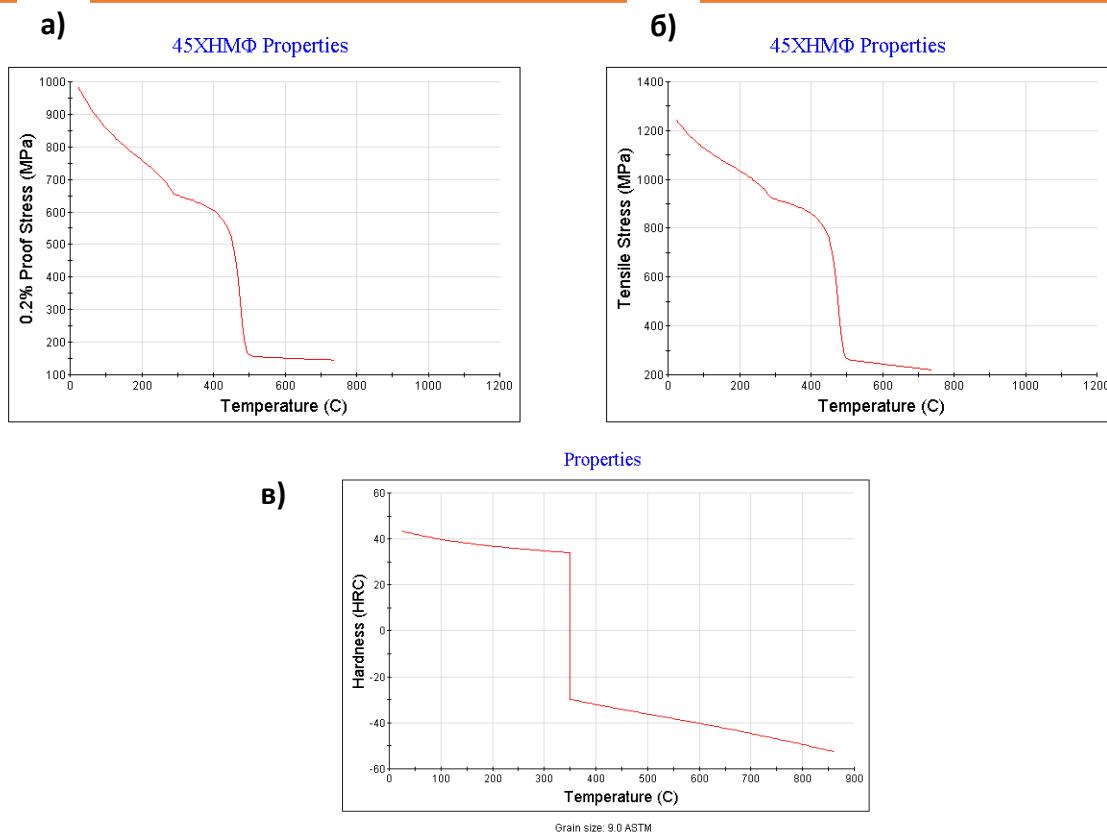


Рис. 2. Механические свойства стали 45 ХН2МФА

а) предел текучести; б) напряжение при деформации; в) твердость по Роквеллу

ССТ- и ТТТ-диаграммы подтверждают (рисунки 4 и 5), что при быстром охлаждении образуется мартенсит, при средних скоростях – бейнит, а при медленном – перлит и феррит. Это позволяет регулировать механические свойства стали в зависимости от условий эксплуатации.

Fe-1.07Cr-0.31Cu-0.787Mn-0.5Mo-1.61Ni-0.128Si-0.05V-0.5C-0.0079P-0.0044S wt(%)

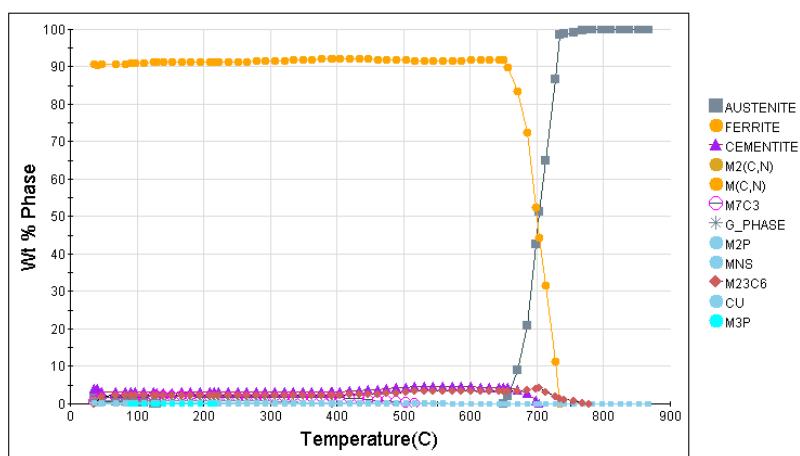


Рис. 3. График фазовых превращений стали при нагреве.

На рисунке 3, представлен график фазовых превращений стали 45ХН2МФА. При низких температурах (~до 700°C) структура стали в основном состоит из феррита (желтые точки) и цементита (фиолетовые ромбы), что характерно для перлитной стали. По мере нагрева, около 700-750°C, феррит начинает растворяться, а его содержание резко падает, что указывает на переход в аустенитную фазу (серые



квадраты). При дальнейшем повышении температуры (выше 800°C) сталь полностью превращается в **аустенит**, который становится доминирующей фазой. Наблюдаются на данном графике мелкодисперсные карбиды (M₂(C,N), M(C,N), M₇C₃, M₂₃C₆), которые присутствуют в небольших количествах на всем температурном диапазоне, указывая на легирование хромом, молибденом и ванадием, что повышает прочность стали при высоких температурах.

Приведенный фазовый анализ (рисунок 3) важен для термической обработки: температура выше 800°C подходит для аустенитизации перед закалкой, тогда как на более низких температурах (~600-700°C) возможен процесс отпусков, приводящий к равномерному распределению карбидов и улучшению механических свойств.

Рассмотрим диаграммы CCT (непрерывного охлаждения) и TTT (изотермического превращения), которые представлены на рисунках 4 и 5, где показаны фазовые превращения стали при различных режимах термообработки.

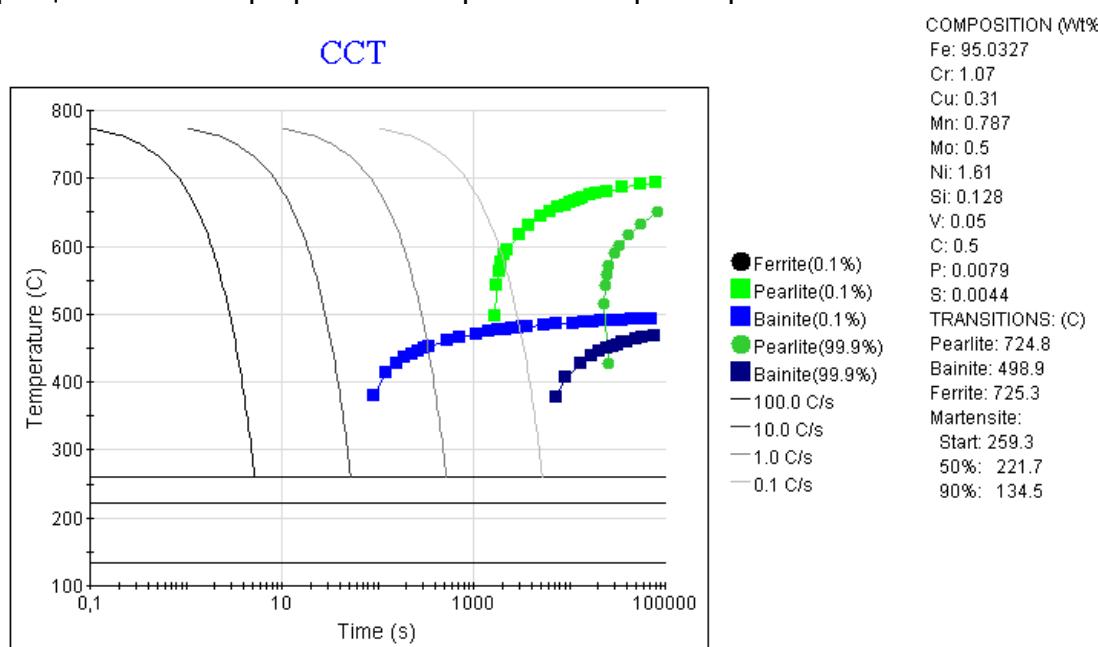


Рис.4. График непрерывного охлаждение стали 45ХН2МФА.

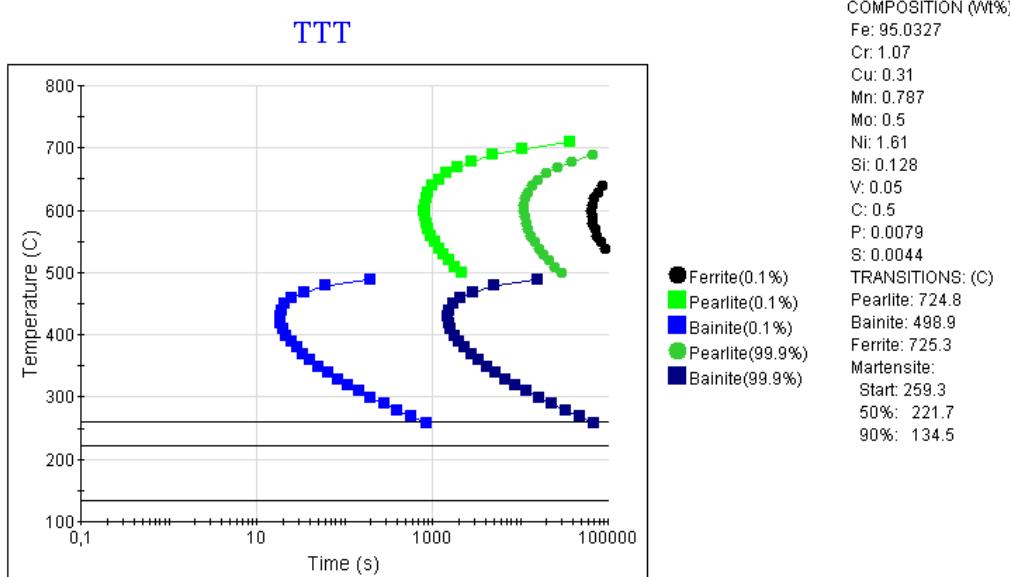


Рис.5. Изотермическое превращение.



CCT-диаграмма демонстрирует, что при быстром охлаждении (100°C/s) формируется мартенсит ($Ms = 259.3^{\circ}\text{C}$), при средних скоростях – бейнит (498.9°C), а при медленном – перлит и феррит ($\sim 724.8^{\circ}\text{C}$). TTT-диаграмма подтверждает эти превращения при изотермическом удержании: перлит образуется при высоких температурах, бейнит – при средних, а мартенсит – при закалке. Быстрая закалка приводит к высокой твердости, но хрупкости, средние скорости охлаждения дают прочный и пластичный бейнит, а медленное охлаждение образует мягкий, но пластичный перлитно-ферритный состав. Выбор режима охлаждения позволяет управлять механическими свойствами стали в зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик.

Формирование бейнита и его расчет. Бейнит образуется в интервале температур, который можно определить из TTT-диаграммы (рисунок 5). Основные факторы, влияющие на его образование:

1. Температура начала образования бейнита – Bs (Bainite start)

$$\begin{aligned} Bs(^{\circ}\text{C}) &= 830 - 270C - 90Mn - 37Ni - 70Cr - 83Mo \\ Bs(^{\circ}\text{C}) &= 830 - 270C - 90Mn - 37Ni - 70Cr - 83Mo \\ Bs(^{\circ}\text{C}) &= 830 - 270C - 90Mn - 37Ni - 70Cr - 83Mo \end{aligned}$$

2. Температура конца образования бейнита – Bf (Bainite finish)

$$Bf(^{\circ}\text{C}) = Bs - 150Bf(^{\circ}\text{C}) = Bs - 150Bf(^{\circ}\text{C})$$

где: C, Mn, Ni, Cr, Mo – массовые доли элементов (%).

Расчет образования бейнита проводилось на программном обеспечении Python на основе составленных уравнений Bs и Bf с использованием модулей matplotlib и numpy, полученный график приведен на рисунке 6.

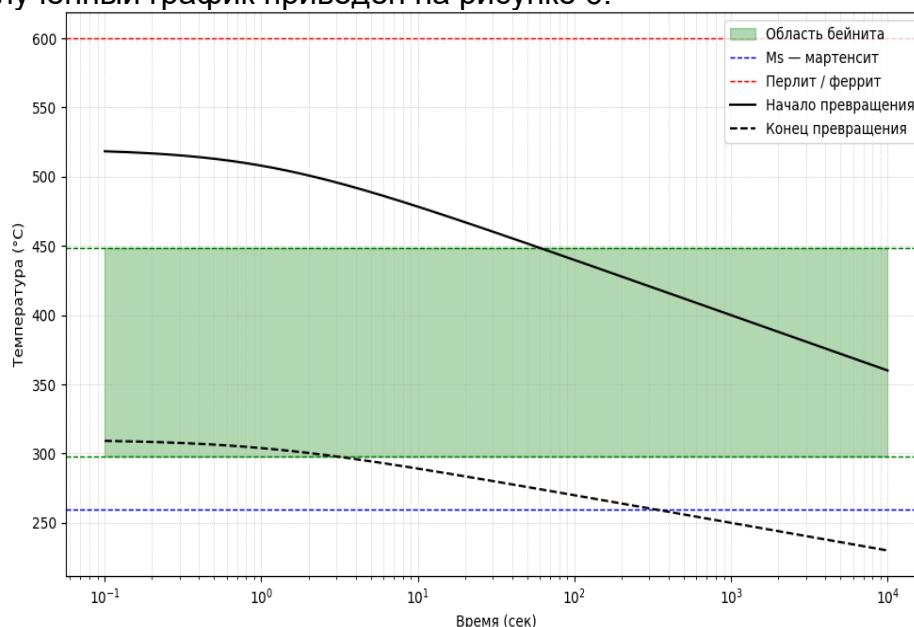


Рис.6. Диаграмма TTT с выделанной областью бейнита.

На рисунке 6, приведен процесс охлаждения при закаливания стали 45ХН2МФА, метки с выделенной областью зеленого цвета начало 448°C и конец 298°C . Если охлаждение будет проходить выше 448°C , то сталь останется аустенитной, а если ниже 298°C – начнется мартенситное превращение.

Также необходимо учесть скорость охлаждения, то есть если охлаждение будет медленнее, начнет образовываться перлит, а если быстрее, то при переходе через 298°C может начаться мартенситное превращение. Для определения скорости охлаждения необходимо рассчитать образования бейнита по формуле:



$$Vc = \frac{2.303 \cdot C}{t} \quad (1)$$

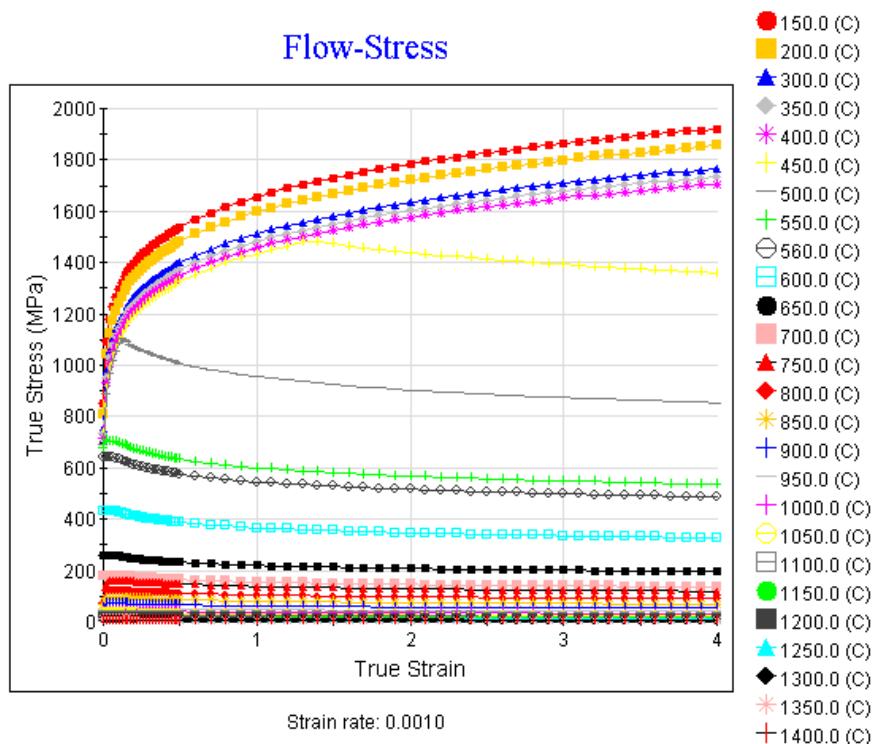
где Vc – критическая скорость охлаждения ($^{\circ}\text{C}/\text{сек}$), C – массовая доля углерода (%), t – время начала образования бейнита (из TTT-диаграммы).

Подставляя значения:

$$Vc = \frac{2.303 \cdot 0.5}{10} = 0.115^{\circ}\text{C}/\text{сек}$$

Это означает, что для получения бейнитной структуры скорость охлаждения должна быть в районе $0.115^{\circ}\text{C}/\text{сек}$, но не слишком высокой, чтобы не образовался мартенсит.

Для оптимизации режимов горячей обработки при демформации стали 45ХН2МФА, необходимо провести расчет пластичности относительно температуры. На рисунке 7, представлен расчет анализ кривые пластической деформации (Flow Stress Analysis).



Е

Рис.7. График зависимости истинного напряжения от истинной деформации при различных температурах.

Данный расчет демонстрирует пластическое течение стали при различных температурах, где установлено, что при температуре 1100°C (режим ВТМО) сопротивление деформации существенно снижается до ~ 180 МПа, что подтверждает технологичность кручения при высокой температуре без риска разрушения.

Заключение

Исследование показало, что влияние термической обработки на сталь 45ХН2МФА с учетом научных данных может привести к следующим результатам:

1. при закалке и отпуске (режим 1) формируется структура с высоким содержанием мартенсита, обеспечивающая высокую твердость и прочность. При двойной закалке (режим 2) повышается равномерность распределения мартенсита и



карбидов, улучшая механические свойства, однако наблюдается хрупкость. ВТМО (режим 3) способствует образованию структуры бейнита и остаточного мартенсита, обеспечивая баланс между прочностью и пластичностью, при этом достигается максимальная вязкость ($KV = 14$ Дж). Отпуск под напряжением (режим 4) дополнительно улучшает сопротивление образцов кручению и трещиностойкость, а также способствует формированию наиболее дисперсной карбидной фазы.

2. при температуре выше 780°C начинается полное превращение в аустенит. Основное превращение происходит между $400\text{--}500^{\circ}\text{C}$ (бейнит + мартенсит \rightarrow аустенит). При охлаждении активируются превращения в бейнит, необходимая скорость охлаждения по расчетам равна $0,115^{\circ}\text{C}/\text{сек}$ и держится в диапазоне между 448°C и 298°C . Максимальная доля мартенсита фиксируется при охлаждении ниже 250°C .

3. предел текучести (0.2% proof stress) снижается с 1000 МПа (при 20°C) до ~ 200 МПа при $500\text{--}600^{\circ}\text{C}$, подтверждая эффект отпускной мягкости. Предел прочности падает с ~ 1250 МПа до ~ 300 МПа в том же диапазоне. Твердость (HRC) после отпуска при $300\text{--}400^{\circ}\text{C}$ составляет 40 - 45 HRC, что коррелирует с экспериментальными данными.

Список использованной литературы:

- [1.] Thomas, G. D., & Samuel, J. R. (1960). Heat treatment and properties of iron and steel. National Bureau of Standards Monograph 18.
- [2.] Беккерт М., Клемм Х. Металлографическое травление.
- [3.] Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. В 2-х т. – М.: Металлургия, 1996.
- [4.] Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979.
- [5.] Энтин Р.М. Превращения аустенита в стали. – М.: Металлургиздат, 1960.
- [6.] Egamberdiyev I.P., Hamroev N.N., Ashurov X.X., Saibov M.F. Strukturaviy tashkil etuvchilarning yeyilishga bardoshlilik xususiyatiga ta'sirini tahlil qilish // O'zbekiston konchilik xabarnomasi ilmiy texnik va ishlab chiqarish jurnali №97. ISSN 2181 – 7383.
- [7.] Иголкин А.Ф., Андреев А.К., Вологжанина С.А., Смирнова Ю.А. Влияние режима термической обработки на упругие свойства и хладостойкость хромоникельмolibденовой стали // Низкотемпературные и пищевые технологии XXI века.
- [8.] Агасьянц Г.А., Легкодух А.М., Смирнов С.В. Влияние исходной структуры на свойства стали 45ХН2МФА при холодной продольной прокатке // Обработка металлов давлением.