

УДК 669.15:621.9.001.57

С.В.Бобырь, Е.Е.Нефедьева, Д.В.Лошкарев

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОТПУСКА СТАЛИ 17Х5МА ДЛЯ ИНСТРУМЕНТА ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины

Приведена методика решения задачи оптимизации процесса отпуска инструмента разных типоразмеров для горячей деформации. Путем расчетов и моделирования найдены длительности операций закалки и отпуска, а также температуры отпуска для головок пуансона прессы 2000 тн.

Ключевые слова: инструмент для горячей деформации, моделирование, закалка, отпуск

Введение и постановка задачи. Как известно, мартенсит в сталях, полученный в процессе закалки, является очень твердой, но в тоже время и хрупкой структурной составляющей [1, 2]. При отпуске стали происходит фазовый переход от метастабильного состояния α -фазы к стабильному, с удалением углерода из мартенсита и образованием карбидной фазы [3]. При этом твердость стали снижается, достигая значений, которые характеризуют необходимое структурное состояние и обеспечивают требуемые технологические свойства стали – ударную вязкость, износостойкость, термостойкость и др. [4].

Теоретическое описание процесса выделения карбидов из стали при отпуске, основанное на уравнениях неравновесной термодинамики, было рассмотрено ранее [5]. В данной работе выполнена постановка задачи оптимизации процесса отпуска стали и ее решение для некоторых деталей инструмента горячей деформации.

Система, для которой ставится задача оптимизации, должна описываться системой дифференциальных уравнений [6,7]:

$$\frac{\partial Pi}{\partial t} = F(Ci, U, Xk), \quad (1)$$

где Pi – переменные состояния, или фазовые координаты;

Xk – пространственные переменные;

U – параметр управления.

Задача оптимизации состоит в том, чтобы минимизировать функционал (2), который характеризует переход системы из начального в конечное состояние

$$F = \int_0^t f(Ci, U, Xk) dt = \min. \quad (2)$$

В нашем случае в качестве параметра управления выступает температура отпуска, переменными состояниями являются текущая температура изделия (T) и твердость на поверхности стального изделия (H), а в качестве функционала могут выступать время и

энергетические затраты процесса. Схематичная зависимость твердости стали от времени и температуры отпуска приведена на рис.1.

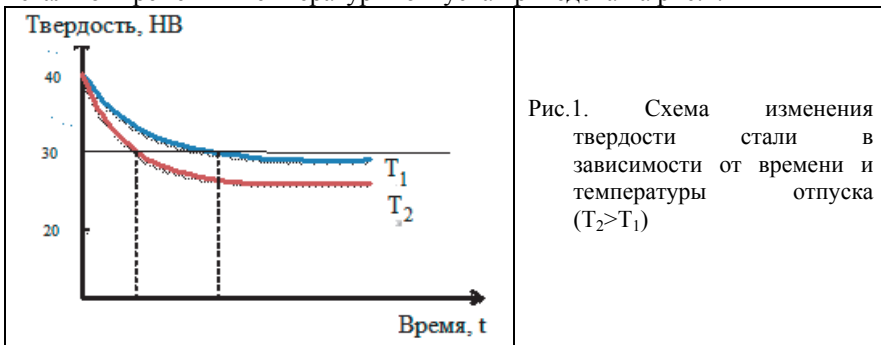


Рис.1. Схема изменения твердости стали в зависимости от времени и температуры отпуска ($T_2 > T_1$)

Пусть нам за время отпуска требуется достичь необходимой твердости на поверхности стального изделия (H_T), представленной на рис.2 линией. Чем больше температура отпуска (T_0), тем меньше время (t) отпуска, т.е. меньше значение функционала (2). Однако время отпуска не может снижаться до очень малого значения; оно имеет свои ограничения, связанные как со скоростью процесса нагрева и текущей температурой изделия (она не превысит расчетной величины), так и скоростью диффузионных процессов, протекающих в объеме изделия. Наименьшее расчетное время отпуска обозначим как t_p . Тогда оптимизация процесса отпуска будет состоять в том, что отпуск выполняется при температуре t_0 , при которой за время t_p твердость снижается до требуемого значения H_T .

Однако для реализации такой процедуры необходимо знать, как изменяется твердость при различных температурах и скоростях нагрева (массе изделия). Поэтому для оптимизации процесса термической обработки инструмента горячей деформации разработана следующая методика:

- расчет минимальной длительности операций закалки и отпуска для инструмента горячей деформации разных типоразмеров (на примере головок пресспуансона пресса 2000 тн).
- экспериментальное построение графика изменения твердости образцов из стали 17X5МА, в зависимости от времени отпуска при постоянной температуре
- построение модели процесса изменения твердости при отпуске образца, отвечающей экспериментальным данным.
- определение с помощью моделирования оптимальных температур отпуска для инструмента горячей деформации разных типоразмеров.

Результаты исследований.

Расчет длительности операций закалки и отпуска для инструмента горячей деформации (на примере головок пресспуансона пресса 2000 тн).

Продолжительность нагрева при закалке и отпуске была рассчитана по формуле [8]:

$$\tau_n = \frac{G}{F} \frac{c}{\alpha} 2,3 \lg \frac{t_{вс} - t_{мн}}{t_{вс} - t_{мк}} \quad (3)$$

где G – вес изделия в кг; F – поверхность изделия в m^2 ; $t_{вс}$ – температура внешней среды в $^{\circ}C$; $t_{мн}$ и $t_{мк}$ – температура металла начальная и конечная в $^{\circ}C$; c – средняя теплоемкость металла в ккал / (кг · град); α – коэффициент теплоотдачи в ккал/($m^2 \cdot час \cdot град$), определяемый по графику на рис.2.

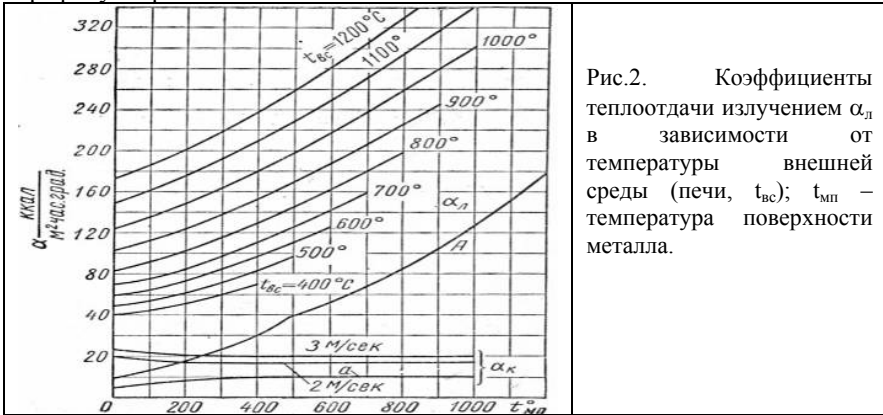


Рис.2. Коэффициенты теплоотдачи излучением α_l в зависимости от температуры внешней среды (печи, $t_{вс}$); $t_{мп}$ – температура поверхности металла.

Средняя теплоемкость (c) стали 17X5MA при закалке была принята 0,15, а при отпуске 0,12 ккал / (кг · град), коэффициент теплоотдачи (α) – 160 и 90 ккал/($m^2 \cdot час \cdot град$).

Для расчета продолжительности нагрева изделий в печах с газовой средой также была использована формула Б.В. Старка:

$$\tau = \frac{Gc}{FC} \cdot \frac{100}{\left(\frac{T_{вс}}{100}\right)^3} \left[\psi \left(\frac{T_{мк}}{T_{вс}} \right) - \psi \left(\frac{T_{мн}}{T_{вс}} \right) \right] \quad (4)$$

где C – коэффициент лучеиспускания, $\approx 4,0$ ккал / ($m^2 \cdot час \cdot град^4$); $T_{мн}$ и $T_{мк}$ – температура металла начальная и конечная в $^{\circ}K$; ψ – функция $T / T_{вс}$, определяемая по графику на рис.3.

Площадь поверхности головок рассчитывали по формуле:

$$F = 2 \pi R_0 (R_0 + H_0) + 2 \pi R_1 H_1, \quad (5)$$

где R_0 – наружный радиус головки, H_0 – высота головки (180 мм), R_1 – радиус выреза головки, H_1 – глубина выреза головки (140 мм).

Расчетная продолжительность закалки и отпуска головок преспуансона внесена в табл.1. Как видно из табл.1, расчеты по формуле 3 дают минимальную расчетную продолжительность процессов закалки и отпуска.

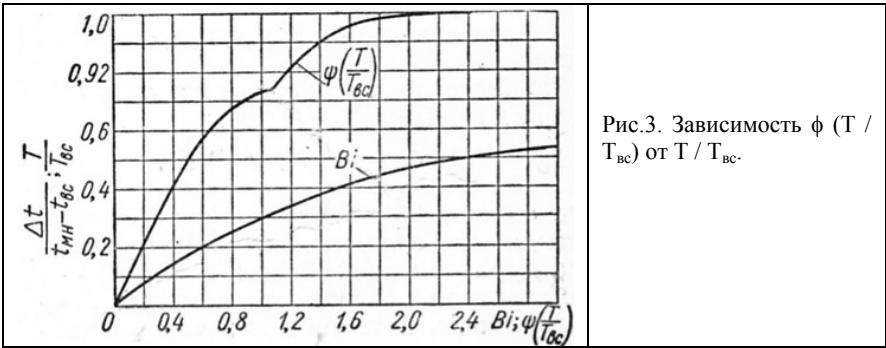


Рис.3. Зависимость $\phi(T/T_{вс})$ от $T/T_{вс}$.

Продолжительность отпуска, рассчитанная по формуле (4) и по эмпирической формуле**, является гораздо более длительной и широко применяется в практике термической обработки.

Таблица 1. Расчетная продолжительность заковки и отпуска для головок пресспуансона разного диаметра

Диаметр головок, мм	160, 180	200	220	240	270
Продолжительность нагрева при заковке (формула 3), мин	33	36	40	44	51
Продолжительность заковки (формула 4), мин	56	61	70	78	92
Продолжительность нагрева при отпуске (формула 3), мин	42	46	51	56	63
Продолжительность отпуска (формула 4), мин	145	158	177	193	222
Длительность заковки*, мин	45	65	80	95	115
Длительность отпуска**, мин	90	130	160	190	230

* - расчет по эмпирической формуле 1 мин на 1 мм сечения [1];

** - расчет по эмпирической формуле 2 мин на 1 мм сечения.

С целью оптимизации процесса термической обработки, рекомендованную продолжительность заковки и отпуска рассчитывали по формуле (табл.2):

$$t_{рз} = t_p + \Delta t, \quad (6)$$

где t_p - продолжительность нагрева по формуле 3;

Δt - продолжительность выдержки при заковке и отпуске (7...9мин)

Для того, чтобы реализовать отпуск с такой небольшой продолжительностью, необходимо точно выбрать его температуру, а для этого нужно иметь экспериментальные данные.

Таблица 2. Расчетная продолжительность заковки и отпуска

Диаметр головок, мм	160, 180	200	220	240	270
Продолжительность заковки, мин	40	45	50	55	60
Продолжительность отпуска, мин	50	55	60	65	70

Экспериментальное исследование изменения твердости стали 17X5MA при отпуске.

Для обеспечения на поверхности инструмента необходимой твердости 280-320 НВ (30,0 – 32,0HRC) он подвергается термической обработке – закалке при 900 °С с высоким отпуском (575 – 600°С). Экспериментально была установлена зависимость твердости опытных образцов из стали 17X5MA от времени отпуска при температурах 575 и 600°С (рис.4). Как следует из данных, приведенных на рис.4, при температуре отпуска 600°С время выдержки 50-55 мин позволяет обеспечить требуемую твердость. При увеличении времени выдержки до 60-70 мин. температуру отпуска следует понизить до 575°С для обеспечения необходимой твердости инструмента 31-32 HRC.

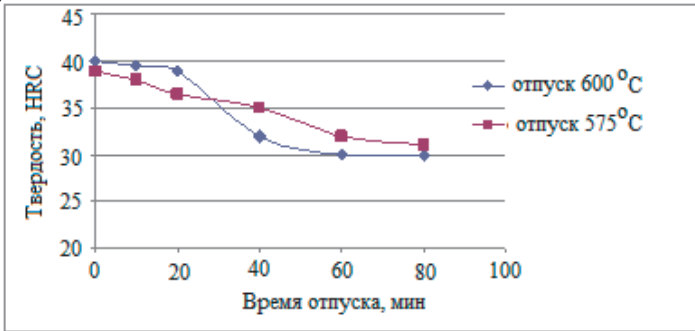


Рис.4. Зависимость твердости опытных образцов из стали 17X5MA от времени отпуска при температуре 575 и 600°С

Структура стали 17X5MA после закалки и отпуска при температуре 600°С приведена на рис.5.

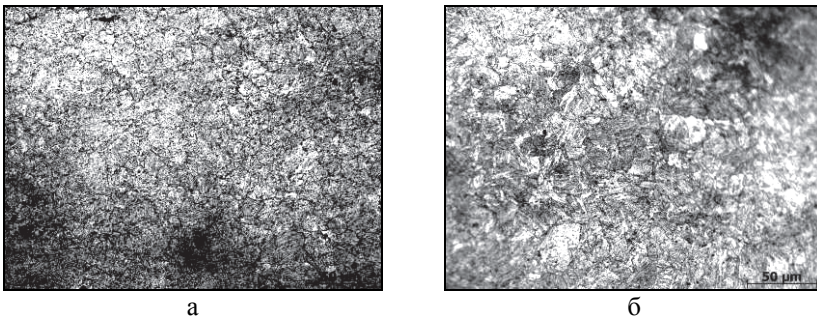


Рис.5. Структура стали 17X5MA после закалки и последующего отпуска при температуре 600°С в течение 40 мин (а) и 80 мин (б), х500.

Микроструктура представляет собой мартенсит отпуска разной степени дисперсности и твердости соответственно.

Моделирование процесса изменения твердости при отпуске и оптимизация температуры отпуска стали.

Для моделирования процесса изменения температуры и твердости при отпуске уравнение (1) представим в более удобном виде:

$$\frac{\partial Pl}{\partial t} = -PlKl(C_i, T, Xk), \quad (7)$$

где $P_1 = T$ – текущая температура изделия;

$P_2 = (H - H_0)$, H – текущая твердость изделия; H_0 – минимально возможная твердость стали после отпуска (~100 HB). Здесь учтено, что твердость изделия не может снижаться менее H_0 .

С учетом формулы (3) коэффициент K_1 в формуле (7) для температуры изделия имеет вид:

$$K_1 = \frac{G \cdot c}{F \cdot \alpha} \quad (8)$$

Коэффициент K_2 для твердости изделия имеет более сложный вид, который попытаемся найти. В общем случае значение этого коэффициента определяется диффузионными процессами, прежде всего, диффузией углерода, и значит, пропорционально коэффициенту диффузии углерода D_c . Во-вторых, значение этого коэффициента определяется тепловыми процессами в образце, т.е. является функцией разности температур печи и изделия $\Delta T = T_p - T$.

Таким образом, в простейшем случае выражение для коэффициента K_2 может быть записано в виде:

$$K_2 = K_p F(\Delta T) D_c, \quad (9)$$

где K_p – коэффициент пропорциональности;

$F(\Delta T)$ – функция разности температур изделия; примем, что

$$F(\Delta T) = F_0 + A_0 \Delta T, \quad (10)$$

F_0, A_0 – коэффициенты;

$$D_c = D_0 \exp(-Q/(2RT_a)), \quad (11)$$

D_0 – коэффициент диффузии, Q – энергия активация диффузии углерода, R – газовая постоянная, T_a – абсолютная температура изделия.

График изменения значения коэффициента K_2 во времени приведен на рис.6, а рассчитанные по разработанной модели графики изменения температуры и твердости образца стали 17X5MA при отпуске представлены на рис.7.

Разработанная модель была применена для оптимизации операции отпуска инструмента горячей деформации - головок пресспуансона прессы 2000 тн разных типоразмеров. На основании результатов моделирования рекомендованы температуры отпуска инструмента горячей деформации - головок пресспуансона прессы 2000 тн разных размеров (табл.3).

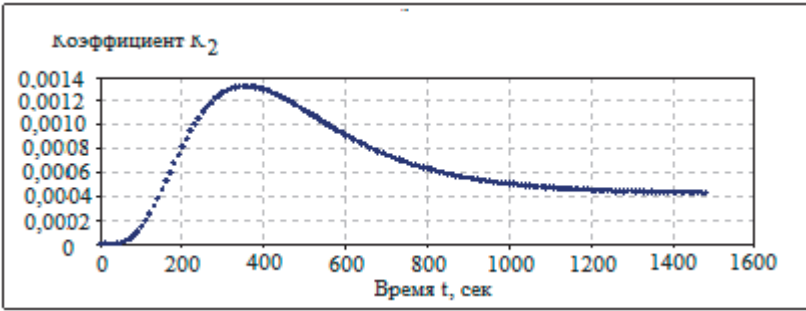
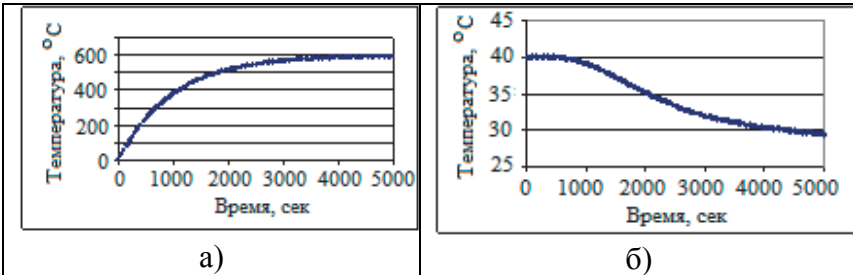
Рис.6. Изменение значения коэффициента K_2 во времени

Рис.7. Модельная зависимость температуры (а) и твердости (б) опытного образца стали 17Х5МА от времени отпуска при температуре 600°C

Таблица 3. Рекомендованные температуры отпуска для головок пресспуансона

Параметры головок пресспуансона			Температура отпуска, °C
Диаметр, мм	Вес, кг	Коэффициент K_1 , c^{-1}	
160	22,7	0.00120	620
180	25,9	0.00123	620
200	33,4	0.00110	600
220	42,5	0.00098	590
240	52,4	0.00090	580
270	71,2	0.00078	575

Выводы.

1. Сформулирована задача оптимизации процесса отпуска инструмента горячей деформации разных типоразмеров, разработана и реализована методика ее решения.

2. Выполнен расчет длительности операций закалки и отпуска для инструмента горячей деформации разных типоразмеров (на примере головок пресспуансона пресса 2000 тн).

3. Разработана новая модель процесса изменения температуры и твердости при отпуске стали.

4. Найдены экспериментальные зависимости твердости образцов стали 17Х5МА от температуры и времени отпуска.

5. Выполнена оптимизация температуры отпуска для инструмента горячей деформации разных типоразмеров.

1. *Бокштейн С.З.* Структура и механические свойства легированной стали. – М.: Metallurgizdat, 1954.
2. *Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И.* Превращения в железе и стали. – М.: Наука, 1977.
3. *Лысак А.И., Николин Б.И.* Физические основы термической обработки стали. – К.: Техніка, 1975. – 304 с.
4. *Новиков И.И.* Теория термической обработки металлов. Уч. для ВУЗов. – М.: Metallurgiya, 1986. – 480 с.
5. *Бобырь С.В.* Неравновесный термодинамический анализ процесса образования карбидов в хромистой стали при отпуске // *Металлофизика и новейшие технологии.* – 2014. – №10. – С. 1385-1397.
6. *Овчинников П.Ф., Лисицин Б.М., Михайленко В.М.* Высшая математика. Учеб. пособие. – К.: Вища школа, 1983. – 679 с.
7. *Деревянко В.Н., Ершова Н.М., Шаповалова О.В.* Методы оптимального управления в материаловедении // *Строительство, материаловедение и машиностроение: Сб. науч. труд.* – Дн-ск: ПГАСА, 2007. Вып.11, ч.2 – С.93–99.
8. *Шмыков А.А.* Справочник термиста. – М.: Машгиз, 1956. – 332 с.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук, проф. Г.В.Левченко*

С.В.Бобырь, О.Є.Нефедьєва, Д.В.Лошкарєв

Моделювання та оптимізація процесу відпуску стали 17Х5МА для інструменту гарячої деформації

Сформульовано та реалізовано методику вирішення завдання оптимізації процесу відпуску інструменту гарячої деформації різних типорозмірів. Шляхом розрахунків та моделювання визначено тривалість операцій гартування і відпуску та температури відпуску для головок преспуансона преса 2000 тн.

Ключові слова: інструмент гарячої деформації, моделювання, відпуск, мартенсит

S.V.Bobyry, E.E.Nefedeva, D.V.Loshkarev

The modeling and optimization of tempering 17H5MA tool hot deformation

Formulated and implemented a technique for solving the optimization problem of holiday hot deformation tools of different sizes. By calculation and simulation found durations quenching and tempering and annealing temperature for the heads presspuanсона 2000 tons.

Keywords: hot deformation tools, modeling, vacation, martensite