

УДК 669.01

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И РАСЧЕТ  
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

Санчес Мехия М.А

Студент 2 курса магистратуры  
кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника»  
Московский государственный технический университет

Научный руководитель: А.С. Куркин,  
доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка, диагностика и специальная  
робототехника»

В работе представлена математическая модель изотермического распада аустенита на основе модифицированного уравнения Колмогорова-Аврами. Экспериментальная основа модели включает изотермический распад аустенита с регистрацией кинетики образования феррита, перлита и бейнита, определяемой диффузией углерода и легирующих элементов. Графическое представление результатов эксперимента осуществляется посредством построения С-образных кривых, каждая из которых соответствует определенной степени превращения  $p$  – отношения объема образовавшейся новой фазы к общему объему материала, участвующего в превращении. В [1] предложено уравнение С-образной кривой

$$t(T) = t_p \left( \frac{T}{T_S - T} \right)^m \exp\left(\frac{u}{T}\right), \quad (1)$$

где  $t$  – время от начала превращения;  $T$  – температура изотермической выдержки,  $t_p$  – временной коэффициент, зависящий от степени превращения,  $T_S$  – верхняя граница температурного интервала превращения,  $m$  – безразмерный параметр, характеризующий асимптотическое приближение верхней ветви кривой к  $T_S$ ,  $u$  – параметр диффузионной подвижности углерода, влияющий на форму нижней ветви кривой.

Параметры  $t_p$  и  $T_S$  могут быть выражены через координаты «носа» кривой  $t_M$  и  $T_M$ , тогда уравнение (1) принимает вид [2]:

$$t = t_M \exp[M(T) - M(T_M)], \quad (2)$$

где введено обозначение

$$M(T) = m \ln \frac{T}{T_S - T} + \frac{u}{T}. \quad (3)$$

Для серии кривых с различными степенями превращения реализован алгоритм пересчета временных координат [2]:

$$t_2 = t_1^n \sqrt[n]{\frac{\ln(1-p_2)}{\ln(1-p_1)}} \quad (4)$$

где  $n$  — экспонента Авраами.

Программная реализация представленной модели выполнена в Python с использованием библиотек Tkinter и Matplotlib, что позволяет в интерактивном режиме

производить редактирование параметров для достижения оптимального совпадения расчетных кривых с экспериментальными данными. Такой подход обеспечивает возможность отображения кинетики превращения аустенита и выбора оптимальных режимов термической обработки для достижения требуемых свойств стали.

На рисунке 1 представлено сравнение результатов работы программы с экспериментальной диаграммой распада аустенита [3]. Выделенные красные точки, отображающие образование бейнитной и феррито-перлитной структур при 520°C и 600°C, подтверждают совпадение расчетных и экспериментальных значений времени превращения для указанных температур.

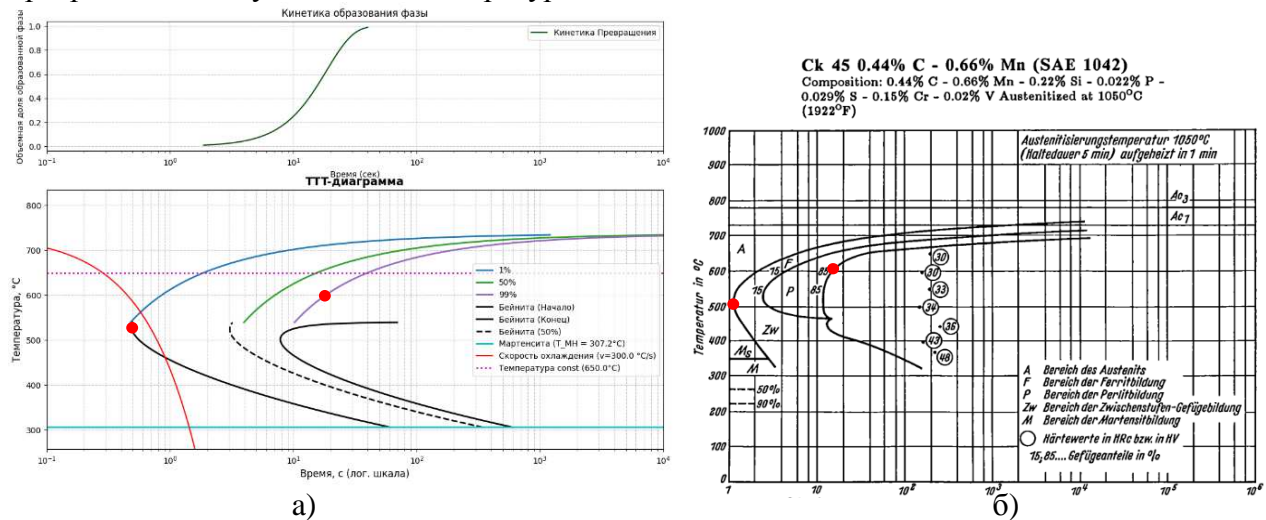


Рис. 1. Сравнение кривых изотермического превращения стали SAE 1042. а) данные [3], б) результаты моделирования

Программа позволяет проанализировать кинетику фазовых превращений при заданной температуре, а также рассчитать свойства каждого структурного компонента стали.

### Литература

1. Счастливцев В.М., Мирзаев Д.А., Яковлева И.Л., Окишев К.Ю., Табатчикова Т.И., Хлебникова Ю.В. Перлит в углеродистых сталях. - Екатеринбург: УрО РАН. - 2006. - 312 с.
2. Куркин А.С. Исследование кинетики фазовых превращений легированной стали методами математического моделирования // Диагностика материалов. - 2019. - Т. 85. - № 12. - С. 25-32.
3. Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels / Edited by G.F. Vander Voort. - ASM International. - 1991. - 766 p.