

М.Л. Хейфец, д.т.н.
(ОАО «НПО «Центр» НАН Беларуси, 220018, Беларусь, г. Минск, ул. Шаранговича, 19)
E-mail: mlk-z@mail.ru

Самоорганизация и управление структурно-фазовыми превращениями материалов для обеспечения качества изделий машиностроения*

Проведен анализ самоорганизации структур при интенсивных комплексных технологических воздействиях путем выделения параметров порядка при охлаждении материалов или разгрузке изделий с определением устойчивости режимов состояния термодинамической системы. Предложены пути интенсификации процессов структурообразования при обработке материалов и стабилизации структур, реализующие сочетание управляющих параметров давления и термических воздействий.

Ключевые слова: структурные превращения; фазовые переходы; устойчивость термодинамической системы; термическая обработка; резание; пластическая деформация материала.

M.L. Heifets, Dr. Sc. Tech.
(PC “SPC “Center” of NAS of Belarus, 19, Sharangovich Str., Minsk, Belarus, 220018)

Self-organization and control of structural-phase transformations of materials for engineering product quality assurance

The analysis of structures self-organization at intensive complex technological impacts by means of the separation of order parameters at material cooling and product discharge with the mode stability definition in a thermo-dynamic system state is carried out. There are offered ways for the intensification of structure formation processes at material processing and structure stabilization realizing the combination of control parameters of pressure and thermal impacts.

Keywords: structural transformations; phase transfers; stability of thermo-dynamic system; thermal treatment; cutting; plastic deformation of material.

Введение

Для обеспечения эксплуатационных свойств изделий машиностроения необходимо, чтобы в результате термических, деформационных или других интенсивных воздействий в их материалах произошли необратимые изменения, обусловленные фазовыми переходами. Если материал после интенсивных воздействий находится в структурно – неравновесном состоянии, то обработка тоже необходима, хотя фазовые превращения в нем не происходят [1].

* Исследования поддержаны грантом РФФИ 18-58-00009-Бел_a и БРФФИ T18P-183.

Изменения строения и свойств структур металлов и сплавов во времени определяются температурой, давлением и другими интенсивными факторами их образования [2]. Происходящие при обработке процессы описываются теорией термической обработки металлов, отражающей кинетику превращений при различных температурах, и влияющие на ее ход факторы [3].

Всестороннее давление до настоящего времени активно не применялось для управления структурообразованием в материалах [4]. Сдерживают применение обработки давлением для формирования структур в металлах и

сплавах технологические сложности управления процессом и недостаточная ясность, насколько эффективно может быть использовано давление для получения особых свойств материалов [5].

Цель работы – представить с позиций единого формализма, основанного на комплексном синергетическом подходе, фазовые переходы и структурообразование при термических операциях, обработке давлением и термомеханических воздействиях для формирования теоретических основ технологических процессов образования структур и фаз в металлах и сплавах при использовании режимов кристаллизации с изменением давления.

Синергетическая концепция состояния термодинамической системы

Для определения доминирующих процессов структурообразования при интенсивных воздействиях, целесообразно применить синергетическую концепцию, использующую понятие *моды* непрерывной случайной величины контролируемого параметра [6].

Под модой понимают такое значение параметра, при котором плотность его распределения имеет максимум. Согласно синергетической концепции устойчивые моды подстраиваются под доминирующие неустойчивые моды и в результате могут быть исключены. Это приводит к резкому сокращению числа контролируемых параметров – степеней свободы термодинамической системы. Оставшиеся неустойчивые моды могут служить в качестве параметров порядка, определяющих процессы структурообразования [7].

Получившиеся в результате такого сокращения параметров уравнения состояния термодинамических систем, группируются в несколько универсальных классов следующего вида [6, 7]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} U = G(U, \nabla U) + D \nabla^2 U + F(\tau),$$

где U – контролируемый параметр; τ – текущее время; G – нелинейная функция U и возможно градиента U ; D – коэффициент, описывающий диффузию, когда его значение действительно, или описывающий распространение волн, при мнимом значении; F – флуктуирующие силы, обусловленные взаимодействием с внешней средой и диссипацией внутри системы.

Уравнения такого вида схожи с уравнениями, описывающими фазовые переходы первого и второго рода. В соответствии с синергетической концепцией фазовые переходы про-

исходят в результате самоорганизации, процесс которой описывается тремя степенями свободы, отвечающими параметру порядка (Π), сопряженному (C) ему полю и управляющему (Y) параметру [7].

Использовать единственную степень свободы – параметр порядка, возможно для описания только квазистатического фазового преобразования. В системах, значительно удаленных от состояния термодинамического равновесия, каждая из указанных степеней свободы приобретает самостоятельное значение. В них процессы самоорганизации складываются в результате конкуренции положительной обратной связи параметра порядка с управляющим параметром и отрицательной обратной связи с сопряженным полем. В результате, кроме процесса релаксации к равновесному состоянию в течение времени τ^p при участии двух степеней свободы может реализовываться автоколебательный режим, а при участии трех – возможен переход в хаотическое состояние [6, 7].

Таким образом, состояние термодинамических систем при интенсивной обработке и эксплуатации характеризуется несколькими режимами [8, 9]:

1) *запоминания* – который определяется «замороженным» беспорядком при переходе из неупорядоченного состояния и реализуется, когда время релаксации параметра порядка окажется намного меньше остальных ($\tau_{\Pi}^p \ll \tau_Y^p$ и $\tau_{\Pi}^p \ll \tau_C^p$);

2) *релаксационный* – реализуется, когда время релаксации параметра порядка намного превосходит время релаксации остальных степеней свободы ($\tau_{\Pi}^p \gg \tau_Y^p$ и $\tau_{\Pi}^p \gg \tau_C^p$);

3) *автоколебательный* – требует соизмеримости характерных времен изменения параметра порядка и управляющего параметра или сопряженного поля ($\tau_{\Pi}^p \gtrsim \tau_Y^p$ или $\tau_{\Pi}^p \gtrsim \tau_C^p$);

4) *стохастический* – характеризуется странным аттрактором и возможен при соизмеримости времени всех трех степеней свободы ($\tau_Y^p \gtrsim \tau_{\Pi}^p \gtrsim \tau_C^p$).

Доминирующие процессы структурообразования определяются интенсивностью во времени переноса энергии и вещества в неравновесных термодинамических системах. Стабильность формирования структур обеспечивается управлением устойчивостью процессов интенсивной обработки и эксплуатации путем применения положительных и отрицательных обратных связей [9, 10].

Термическая обработка металлов и поверхностные воздействия потоками энергии

Цель любого процесса термической обработки состоит в том, чтобы нагревом (или охлаждением при закалке холодом) до определенной температуры и последующим ее изменением обеспечить желаемое строение материала [1]. Режим термической обработки характеризуется следующими основными параметрами: температурой нагрева и временем выдержки при ней, скоростями нагрева и охлаждения материала [4].

Все виды термической обработки по А.А. Бочвару [2], разделены на четыре основные группы операций, которые, согласно синергетической концепции структурообразования, можно связать с режимами поведения термодинамической системы.

Режимы определяются временем релаксации τ^p : параметра порядка (Π) при *охлаждении*, сопряженного (C) с ним параметра *структурообразования* и управляющего ($У$) термообработкой параметра – *нагрева*. Наличие двух степеней свободы определяет термический цикл, а трех – сопровождение цикла фазовыми переходами.

В результате реализуются группы операций термической обработки [2, 4]:

1) **закалка** – *нагрев* выше температуры превращения с последующим *быстрым охлаждением* для получения *структурно-неустойчивого* состояния;

2) **отпуск** – *нагрев* закаленного материала ниже температуры превращения с последующим *охлаждением* для получения более *устойчивого структурного* состояния;

3) **отжиг первого рода** – *нагрев* материала в неустойчивом состоянии после предшествовавшей обработки, с последующим *медленным охлаждением*, приводящий в более *устойчивое структурное* состояние;

4) **отжиг второго рода** – *нагрев* выше температуры превращения с последующим *медленным охлаждением* для получения *структурно-устойчивого* состояния.

Группы операций термической обработки могут быть связаны с режимами равновесия термодинамической системы [8, 9]. Из шести возможных состояний равновесия управляемой двухпараметрической системы не наблюдается только самое стабильное – устойчивый узел (УУ) [9].

Закалке соответствует режим – неустойчивый узел (НУ). Из этого, самого неустойчивого состояния, система через режим – неустойчивый фокус (НФ) переходит в процессе *отпуска* или *отжига первого рода* к состояниям,

характеризующимся режимами устойчивого фокуса (УФ) или предельного цикла (ПЦ). Фазовые превращения *при отпуске второго рода* после закалки переводят термодинамическую систему из состояния с режимом НУ в состояние, характеризующееся режимом неустойчивое седло (НС).

Рассмотренные режимы равновесных состояний термодинамической системы НУ и НС особенно ярко наблюдаются при интенсивной обработке (рис. 1). Так, образование модифицированной структуры титанового сплава на максимальной площади при электронно-лучевой поверхностной обработке характеризуется режимом НУ, трансформирующимся в предельный цикл. Формирование поверхности раздела границы плавления описывается режимом НС. Движения от поверхности раздела в противоположных направлениях путем теплопроводности и конвекции тепловых потоков стабилизируют состояние различных фаз системы [8, 9].

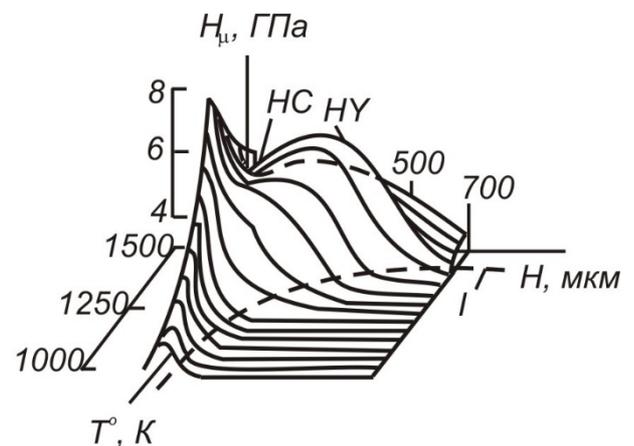


Рис. 1. Распределение микротвердости H_c по глубине H поверхностного слоя титанового сплава с хромоникелевым покрытием при изменении температуры T : видимая граница модифицированного слоя I обозначена пунктиром

Изменение режимов состояния системы можно наблюдать по зависимости микротвердости структур от глубины поверхностных воздействий (см. рис. 1), которые характеризуются физико-химическими превращениями в поверхностном слое титановых сплавов с хромоникелевыми покрытиями [9, 10]. К изменению приводят химические реакции по глубине поверхностного слоя, растворение в твердом состоянии элементов покрытия, оплавление поверхности покрытия, подплавление основы с образованием переходной зоны, формирование диффузионной зоны при электронно-лучевых воздействиях [8, 10].

Пластическая деформация и обработка металлов давлением

Фазовые превращения, используемые при термической обработке, обусловлены, прежде всего, изменением температуры, однако, варьируя другим термодинамическим фактором – давлением, можно получать структурные превращения, которые не проявляются при неизменном давлении [1, 4].

Виды обработки материалов давлением, аналогично видам термической обработки можно согласно синергетической концепции структурообразования разделить на четыре основные группы операций, связанные с режимами поведения термодинамической системы [9, 11].

Режимы обработки давлением также определяются временем τ^p : параметра порядка (П) при *релаксации (снятии напряжений)*, сопряженного (С) с ним параметра *структурообразования* и управляющего (У) механической обработкой параметра – *давления*. Две степени свободы определяют циклическое упрочнение, а три – стохастический наклеп и разрушение.

В результате выделяются процессы обработки металлов давлением, соответствующие различным участкам обобщенной кривой «деформация – напряжение» [11]:

1) **удар** – локальное или всестороннее давление для формирования *напряженного состояния* и образования *деформационных структур* или разрушения;

2) **релаксация напряжений** – отсутствие давления после предварительного нагружения, сопровождающееся снятием внутренних напряжений и формированием более *равновесных структур*;

3) **наклеп циклический** – создание упрочняющих *деформационных структур* путем циклического формирования *напряженного состояния* в результате приложения и снятия нагрузки;

4) **наклеп стохастический** – создание упрочняющих *деформационных структур* путем аperiodического формирования *напряженного состояния* в результате стохастического нагружения.

Процессы обработки давлением, также как и термические связаны с режимами равновесия термодинамической системы [9]. Результаты исследований механической обработки материалов показали, что возможны два режима равновесных состояний: неустойчивый узел и неустойчивое седло [8, 9]. При режиме НУ динамические параметры рабочей зоны технологической системы удаляются от положения равновесия. Система совершает апе-

риодические самовозбуждающиеся движения, которые переходят в устойчивые автоколебания предельного цикла. В режиме НС при малых отклонениях динамические параметры системы удаляются от положения равновесия и приближаются в заданных направлениях к стабильным состояниям (рис. 2).

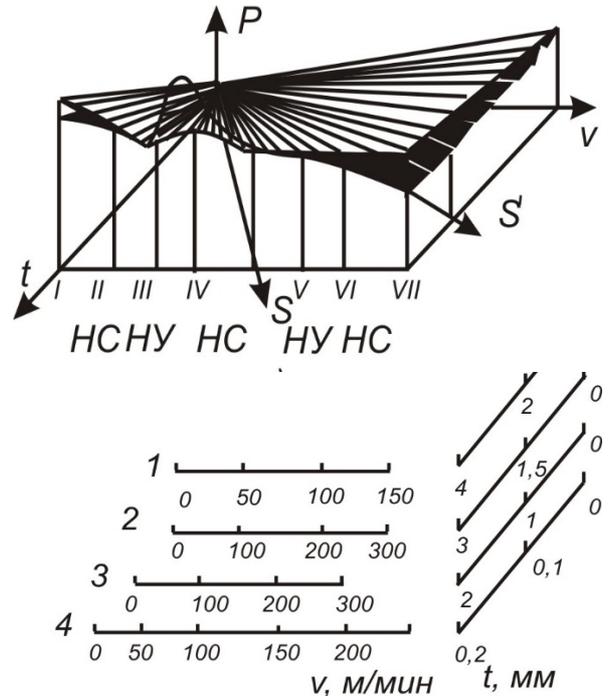


Рис. 2. Зависимости силы деформирования P на различных стадиях I–VI структурообразования в поверхностном слое от скорости v и глубины t воздействия:

1 – для титановых сплавов; 2 – конструкционных сталей; 3 – хромоникелевых сталей и сплавов; 4 – хромоникелевых покрытий

Анализ образования структур поверхностного слоя в процессе механической обработки, при исследовании влияния устойчивости динамических характеристик на формирование параметров качества, показал возможность использования режимов НУ при черновой обработке и позволил рекомендовать режимы НС для чистовой обработки поверхности [8, 9].

Заключение

Таким образом, с позиций единого формализма, основанного на комплексном синергетическом подходе, представлены фазовые переходы и структурообразование в металлах и сплавах при термических операциях и обработке давлением [12].

Установлено, что время релаксации параметров порядка для процессов охлаждения материалов и релаксации напряжений, сопря-

женных им процессов структурообразования, управляющих параметров нагрева и давления определяет режимы поведения термодинамической системы.

На основе выделения характерного времени релаксации параметров порядка для процессов охлаждения материалов и релаксации напряжений определены группы операций термической и механической обработки давлением, связанные со структурообразованием в материалах.

Показаны перспективы интенсификации процессов структурообразования при обработке материалов, реализующие целесообразное сочетание управляющих параметров и рациональные режимы нагрева и деформационных воздействий при комбинированной термомеханической обработке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арзамасов, Б.Н., Крашенинников, А.И., Пастухова, Ж.П., Рахштадт, А.Г. Научные основы материаловедения. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994. – 366 с.
2. Бочвар, А.А. Основы термической обработки сплавов. – М.-Л.: Машгиз, 1940. – 298 с.
3. Штейнберг, С.С. Термическая обработка стали. – М.: Машгиз, 1945. – 154 с.
4. Гуляев, А.П. Термическая обработка стали. – М.: Машиностроение, 1960. – 495 с.
5. Лысак, Л.И., Николин, Б.И. Физические основы термической обработки стали. – Киев: Техника, 1975. – 303 с.
6. Хакен, Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 404 с.
7. Олемской, А.И., Коплык, И.В. Теория пространственно-временной эволюции неравновесной термодинамической системы // Успехи физических наук. – 1995. – Т.165. – № 10. – С.1105-1144.
8. Ящерицын, П.И., Аверченков, А.И., Хейфец, М.Л., Кухта, С.В. // Докл. НАН Беларуси. – 2001. – Т.45. – № 4. – С. 106-109.

9. Ящерицын, П.И., Хейфец, М.Л., Клименко, С.А., Васильев, А.С. // Докл. НАН Беларуси. – 2004. – Т.48. – № 4. – С.107-110.

10. Гордиенко, А.И., Кожуро, Л.М., Хейфец, М.Л., Кухта, С.В. // Докл. НАН Беларуси. – 2004. – Т.48. – № 4. – С.107-110.

11. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.

12. Хейфец, М.Л. // Докл. НАН Беларуси. – 2014. – Т.58. – № 3. – С. 106-111.

REFERENCES

1. Arzamasov, B.N., Krashennnikov, A.I., Pastukhova, Zh.P., Rachstadt, A.G. *Scientific Fundamentals of Material Science*. – M.: Bauman STU of Moscow, 1994. – pp. 366.
2. Bochvar, A.A. *Fundamentals of Alloy Thermal Treatment*. – M.-L.: Machgiz, 1940. – pp. 298.
3. Steinberg, S.S. *Steel Thermal Treatment*. – Machgiz, 1945. – pp. 154.
4. Gulyaev, A.P. *Steel Thermal Treatment*. – M.: Mechanical Engineering, 1960. – pp. 495.
5. Lysak, L.I., Nikolin, B.I. *Physical Fundamentals of Steel Thermal Treatment*. – Kiev: Technics, 1975. – pp. 303.
6. Haken, G. *Synergetics*. – M.: World, 1980. – pp. 404.
7. Olemskoy, A.I., Kopylyk, I.V. Theory of space-time evolution of non-equilibrium thermo-dynamic system // *Successes of Physical Sciences*. – 1995. – Vol. 165. – No.10. – pp. 1105-1144.
8. Yashcheritsyn, P.I., AVerchenkov, A.I., Heifets, M.L., Kukhta, S.V. // *Report of NAS of Belarus*. – 2001. – Vol. 45. – No.4. – pp. 106-109.
9. Yashcheritsyn, P.I., Heifets, M.L., Klimenko, S.A., Vasiliiev, A.S. // *Report of NAS of Belarus*. – 2004. – Vol. 48. – No.4. – pp. 107-110.
10. Gordienko, A.I., Kozhuro, L.M., heifets, M.L., Kukhta, S.V. // *Report of NAS of Belarus*. – 2004. – Vol. 48. – No.4. – pp. 107-110.
11. Heifets, M.L. // *Report of NAS of Belarus*. – 2014. – Vol.58. – No.3. – pp. 106-111.
12. Heifets, M.L. // *Report of NAS of Belarus*. – 2014. – Vol.58. – No.3. – pp. 106-111.

Рецензент д.т.н. В.В. Васильцов

