

УДК 621.7:621.8:621.9:536.75

М. Л. ХЕЙФЕЦ

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В МЕТАЛЛАХ ПРИ ТЕРМИЧЕСКИХ, ДЕФОРМАЦИОННЫХ И КОМБИНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

(Представлено академиком П. А. Витязем)

Государственное научно-производственное объединение «Центр»
НАН Беларуси, Минск

Поступило 17.03.2014

Введение. Для обеспечения эксплуатационных свойств металлов и сплавов необходимо, чтобы в результате термических, деформационных или других интенсивных воздействий в них 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].

Изменения строения и свойств структур металлов и сплавов во времени определяются прежде всего температурой, а также 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].

Выпускаемое в настоящее время оборудование для литья под давлением с управляемой кристаллизацией расплава позволяет использовать комплексно не только охлаждение, но и давление для управления структурообразованием в металлах и сплавах. Наиболее перспективно разработанное для центробежного литья промышленное оборудование, расширяющее технологические возможности управления процессом путем плавного изменения скорости вращения ротора и обеспечивающее за счет громадного центростремительного ускорения (50–300g) высокие давления при кристаллизации расплава [6]. Полученные при литье на таком оборудовании наноструктурные материалы свидетельствуют о перспективности использования режимов структурообразования с изменением давления для получения особых свойств материалов [7].

Цель работы – представить с позиций единого формализма, основанного на комплексном синергетическом анализе, фазовые переходы и структурообразование при термических операциях, механической 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 [8].

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 [9].

Получившиеся в результате такого сокращения параметров уравнения состояния термодинамических систем группируются в несколько универсальных классов вида [8; 9]

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

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 происходят в результате самоорганизации, процесс которой описывается тремя степенями свободы, отвечающими параметру порядка (Π), сопряженному (C) ему полю и управляющему (Y) параметру [9].

Использовать единственную степень свободы – параметр порядка, возможно для описания только квазистатического фазового превращения. 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 [8; 9].

Таким образом, состояние термодинамических систем при интенсивной обработке и эксплуатации характеризуется несколькими режимами [10; 11]:

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

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

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

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

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 [11; 12].

Режимы термической обработки металлов и сплавов. 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 металлов и сплавов 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 временами релаксации τ^p : параметра порядка (Π) при охлаждении, сопряженного (C) с ним параметра структурообразования и управляющего (Y) 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]:

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

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

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

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 [12; 13]. Из шести возможных состояний равновесия управляемой двухпараметрической системы не наблюдается только самое стабильное – устойчивый узел (УУ) [13]. 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 термической обработке. 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 [12; 13]. Изменение режимов состояния системы можно наблюдать по зависимости микротвердости структур от глубины проникновения поверхностных воздействий, которые характеризуются физико-химическими превращениями в поверхностном слое титановых сплавов [12].

Режимы механической обработки металлов давлением. Фазовые превращения, используемые при термической обработке, обусловлены, прежде всего, изменением температуры, однако варьируя другой термодинамический параметр – давление, можно получать структурные превращения, которые не проявляются при неизменном давлении [1; 4].

Виды обработки металлов давлением аналогично видам термической обработки можно, согласно синергетической концепции структурообразования, разделить на четыре основные группы операций, связанные с режимами поведения термодинамической системы [6; 13].

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

В результате выделяются процессы обработки материалов давлением, соответствующие различным участкам обобщенной кривой «деформация–напряжение» [14]:

ударное нагружение – локальное или всестороннее давление для формирования за короткий промежуток времени напряженного состояния и образования деформационных структур или разрушения;

релаксация напряжений – отсутствие давления после предварительного нагружения, сопровождающееся снятием внутренних напряжений и формированием за длительный промежуток времени более равновесных структур;

наклеп циклический – создание деформационных структур путем циклического во времени формирования напряженного состояния в результате приложения и снятия нагрузки;

наклеп стохастический – создание деформационных структур путем аперiodического во времени формирования напряженного состояния в результате стохастического нагружения.

Процессы обработки металлов давлением также как и термические связаны с режимами равновесия термодинамической системы [13]. Результаты исследований механической обработки металлов и сплавов показали, что возможны два режима равновесных состояний: неустойчивый узел и неустойчивое седло [12; 13]. При режиме НУ динамические параметры рабочей зоны технологической системы удаляются от положения равновесия. Система совершает аperiodические 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. 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 материала [12; 13].

Режимы состояния трибологической системы. Совместное действие термических и деформационных факторов описывает деструкцию материала поверхностного слоя и отражает самоорганизацию процессов изнашивания деталей машин и их сопряжений [11; 13; 14].

Процесс изнашивания обладает последствием, если модуль и направление вектора изнашивания $\varphi(X, t)$ в момент времени t зависят не только от модуля и направления вектора нагрузки X в данный момент времени, но и от модуля и направления вектора X в прошедшее время $\tau < t$, а также от величины износа U трущихся поверхностей за отрезок времени $[0, t]$. Для *процесса изнашивания без последствия* характерно то, что модуль и направление вектора $\varphi(X, t)$ в момент времени t зависят от модуля и направления вектора X только в данный момент [15].

В зависимости от времени τ_p , в течение которого сохраняются изменения процесса утраты работоспособности, связанные с предысторией эксплуатации изделия, различают два вида последствий: *первого* и *второго рода* [14; 15]. Последствие первого рода характеризуется тем, что изменения в процессе утраты работоспособности изделия, обусловленные предысторией нагрузочного воздействия X , сохраняются в течение всего срока службы изделия τ_d , т. е. $\tau_p \geq \tau_d$. Если $\tau_p < \tau_d$, то имеет место процесс с «затухающей памятью» – последствие второго рода.

Зависимости износа и разрушения материала поверхности деталей машин от продолжительности работы t отличаются друг от друга видом связей между управляющим (У) параметром – нагрузочным воздействием X и сопряженной (С) с ним интенсивностью изнашивания J . Выбор H – параметра порядка (П) в каждом конкретном случае обусловлен видом связи между определяющим параметром H , по которому производится оценка ресурса работоспособности исследуемого изделия и накопленным износом U [14; 15].

Рассмотрим различные связи между внешними воздействиями и параметрами термодинамической системы f_H , а также между характеристиками процесса утраты работоспособности g_H .

В случае, когда сопряженная параметру порядка H интенсивность изнашивания J зависит только от величины нагрузочного воздействия X :

$$\begin{cases} J(t) = f_H(X(t)), \\ H(t) = g_H(X(t), U(t), t). \end{cases}$$

Рассматривая изнашивание как непрерывный стохастический процесс, получаем изнашивание *без последствия*. При постоянных условиях трения приращение износа $U(\Delta t) = U(t + \Delta t) - U(t)$ не зависит от времени (процесс с независимыми приращениями), следовательно, скорость изнашивания стационарна в период времени τ [14; 15]. Поэтому такой процесс изнашивания описывается режимом с *запоминанием* ($\tau_H^p \ll \tau_U^p$ и $\tau_H^p \ll \tau_C^p$), характеризующимся состоянием НУ.

Процессы утраты работоспособности деталей в периоды приработки и катастрофического разрушения поверхностных слоев не могут быть описаны с помощью приведенных уравнений, так как интенсивности изнашивания J в эти периоды не являются постоянными, а зависят от величин накопленного износа U трущихся поверхностей.

При изменении нагрузочного воздействия в изнашивании трущихся поверхностей [15] в виде особого переходного периода $[t_0, t_1]$ интенсивность изнашивания J отличается от тех значений, которые она принимала при предыдущем уровне нагрузочного воздействия X_{i-1} , и от значения, соответствующего новому уровню X_i :

$$J(t) = \begin{cases} f_H(X_i, X_{i-1}, \dots, X_{i-n}, t), & t_0 \leq t \leq t_1, \\ f_H(X_i, t), & t > t_1. \end{cases}$$

Возникновение переходных периодов с *последствием второго рода* объясняется несколькими причинами [14; 15]: изменением удельных давлений в зоне контакта деталей при переходе с одного уровня нагрузочного воздействия на другой и связанной с этим «вторичной приработкой» трущихся поверхностей; постепенным восстановлением соответствия между величиной нагрузочного воздействия и распределением смазки и продуктов износа на трущихся поверхностях.

Поэтому процессы изнашивания в переходные периоды $[t_0, t_1]$ характеризуются сильной корреляционной связью между приращениями износа $U_i(\Delta t)$ и $U_{i+1}(\Delta t)$ [14; 15]. В связи с этим их следует рассматривать как *релаксационные* ($\tau_{\Pi}^p \gg \tau_{\gamma}^p$ и $\tau_{\Pi}^p \gg \tau_{\text{С}}^p$), тяготеющие к режиму УФ с характерным периодом $[t_0, t_1]$.

В случаях, когда интенсивность изнашивания J зависит как от величины нагрузочного воздействия X , так и от величины накопленного износа U , к рассматриваемому моменту времени t :

$$\begin{cases} J(t) = f_H(X(t), U(t), t), \\ H(t) = g_H(X(t), U(t), t); \end{cases}$$

а при явном учете обратной связи нагрузочного воздействия X^* с износом U :

$$\begin{cases} J(t) = f_H(X^*(t), U(t), t), \\ H(t) = g_H(X^*(t), U(t), t), \\ X^*(t) = q_H(X(t), U(t), t). \end{cases}$$

Изменения в период времени τ интенсивности изнашивания J трущихся сопряжений при постоянном нагрузочном воздействии на входе термодинамической системы X могут быть вызваны двумя группами причин [14; 15]:

не учитываемыми явно обратную связь нагрузки X с износом U , такими как различие физико-механических свойств материала по глубине поверхностного слоя изделия; увеличение в процессе эксплуатации концентрации продуктов износа; старение смазочных материалов, приводящее к ухудшению их трибологических свойств, к изменению теплового режима работы сопряжения и к смене видов изнашивания трущихся поверхностей и т. п.;

учитываемыми изменения зависимости q_H нагрузочного воздействия X^* на детали узла трения в результате износа сопряжения U , которые связаны с увеличением зазоров в трущихся сопряжениях; с трансформацией макрогеометрии поверхностей трения при изнашивании и корoblении деталей; с изменением контактной жесткости подвижных стыков и др.

Рассматриваемые процессы утраты работоспособности с *последствием первого рода* относятся к процессам с сильной корреляцией, у которых существует определенная связь между величинами параметра порядка $H_i(\Delta t)$ и $H_{i+1}(\Delta t)$ даже при сравнительно больших $\tau = t_{i+1} - t_i$. Здесь $H_i(\Delta t) = H(t_i + \Delta t) - H(t_i)$, $H_{i+1}(\Delta t) = H(t_{i+1} + \Delta t) - H(t_{i+1})$, $t_i < t_{i+1}$.

Вследствие этого процессы утраты работоспособности, вызванные первой и второй группами причин, описываются состояниями с двумя и тремя степенями свободы термодинамической системы характеризующимся *автоколебательным* ($\tau_{\Pi}^p \gg \tau_{\gamma}^p$ или $\tau_{\Pi}^p \gg \tau_{\text{С}}^p$), тяготеющим к ПЦ, и *стохастическим* ($\tau_{\gamma}^p \gg \tau_{\Pi}^p \gg \tau_{\text{С}}^p$), тяготеющим к НС режимам.

Определение режимов состояния открытой термодинамической системы в зависимости от условий эксплуатации машины позволяет рациональным образом целенаправленно проектировать детали трибосопряжений.

Заключение. Таким образом, с позиций единого формализма, основанного на комплексном синергетическом анализе, представлены фазовые переходы и структурообразование в металлах и сплавах при термических операциях, механической обработке давлением и термомеханических воздействиях при эксплуатации.

Установлено, что времена релаксации параметров порядка для процессов охлаждения материалов и релаксации напряжений, сопряженных им процессов структурообразования, управляющих параметров нагрева и давления определяют режимы поведения термодинамической системы.

На основе выделения характерных времен релаксации параметров порядка для процессов охлаждения материалов и релаксации напряжений определены группы операций термической обработки, механической обработки давлением и группы процессов утраты работоспособности, 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 литьем под давлением (в том числе центробежным).

Исследования выполнены при финансовой поддержке БРФФИ (Т14Р-198) и РФФИ (14-08-90011).

Литература

1. Арзамасов Б. Н., Крашенинников А. И., Пастухова Ж. П., Рахитадт А. Г. Научные основы материаловедения. М., 1994.
2. Бочвар А. А. Основы термической обработки сплавов. М.; Л., 1940.
3. Штейнберг С. С. Термическая обработка стали. М., 1945.
4. Гуляев А. П. Термическая обработка стали. М., 1960.
5. Лысак Л. И., Николин Б. И. Физические основы термической обработки стали. К., 1975.
6. Хейфец М. Л. // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте. Киев, 2014. С. 252–255.
7. Витязь П. А., Комаров А. И., Комарова В. И. и др. // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Минск, 2013. Кн. 3. С. 105–115.
8. Хакен Г. Синергетика. М., 1980.
9. Олемской А. И., Коплык И. В. // Успехи физических наук. 1995. Т. 165, № 10. С. 1105–1144.
10. Яцерицын П. И., Аверченков А. И., Хейфец М. Л., Кухта С. В. // Докл. НАН Беларуси. 2001. Т. 45, № 4. С. 106–109.
11. Яцерицын П. И., Хейфец М. Л., Клименко С. А., Васильев А. С. // Докл. НАН Беларуси. 2005. Т. 49, № 2. С. 111–116.
12. Гордиенко А. И., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л., Кухта С. В. // Докл. НАН Беларуси. 2004. Т. 48, № 4. С. 107–110.
13. Хейфец М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. М., 2005.
14. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / под ред. П. А. Витязя. Минск, 2010.
15. Яцерицын П. И., Скорынин Ю. В. Работоспособность узлов трения машин. Минск, 1984.

M. L. KHEIFETZ

mlk-z@mail.ru

SYNERGETIC ANALYSIS OF STRUCTURE FORMATION AT TERMICAL, DEFORMATION AND COMBINED TREATMENT OF METALS

Summary

A comparative analysis of structures self-organizing under intense complex technological and operational impacts by separating in time the order parameters with cooling surfaces of materials or unloading goods from the definition of sustainable modes of state of a thermodynamic system has been performed. The ways of structure formation intensification in the processing of metals and alloys that implements a combination of the control parameters of thermal and deformation effects have been developed.