

ФИЗИКА

УДК 621.7:621.8:621.9:536.75

ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

акад., д-р техн. наук А.И. ГОРДИЕНКО

(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск);

д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ

(Президиум НАН Беларуси, Минск);

Т.А. АЛЕКСЕЕВА

(Полоцкий государственный университет);

*д-р техн. наук, проф. С.А. КЛИМЕНКО, канд техн. наук М.Ю. КОПЕЙКИНА
(Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев)*

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

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 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 – на основании комплексного синергетического подхода к фазовым переходам и структурообразованию при термомеханических воздействиях сформировать теоретические и технологические основы образования структур и фаз в металлах и сплавах.

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 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 происходят 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 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 [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 времен ($\tau_{\Pi}^P \ll \tau_Y^P$ и $\tau_{\Pi}^P \ll \tau_C^P$);

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

3) **автоколебательный** – который 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 времен 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].

Термомеханические воздействия в процессах резания материалов. Фазовые превращения, используемые при термической обработке, обусловлены изменением температуры, однако варьируя другим термодинамическим фактором – давлением, можно получать структурные превращения, которые не проявляются при неизменном давлении [1, 4].

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

Режимы обработки давлением также определяются временами τ^P : параметра порядка (Π) при *релаксации (снятии напряжений)*, сопряженного (C) с ним параметра *структурообразования* и управляющего (Y) 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 аperiодического формирования *напряженного состояния* в результате стохастического *нагружения*.

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

сия. 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 (рисунок 1).

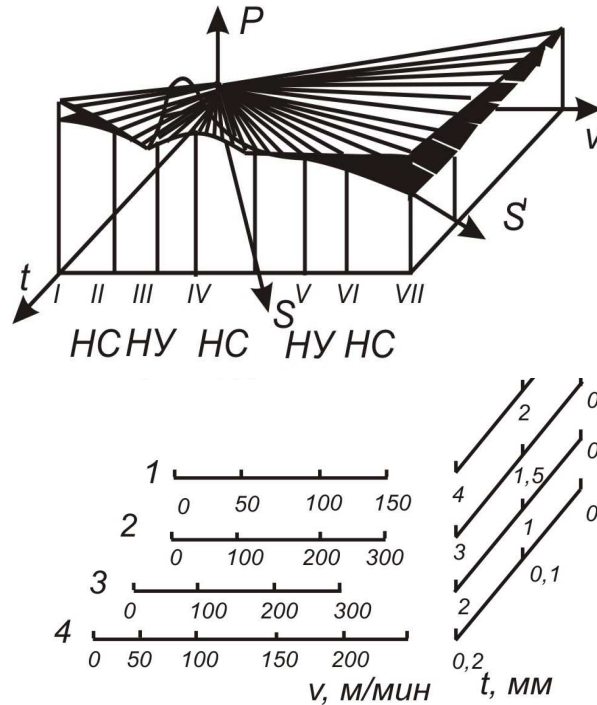


Рисунок 1. – Зависимости усилий деформирования P на различных стадиях (I–VI) структурообразования в поверхностном слое от скорости v (м/мин) и глубины t (мм) воздействия для: 1 – титановых и жаропрочных сплавов; 2 – конструкционных сталей; 3 – хромоникелевых сталей; 4 – хромоникелевых покрытий

Проведенный анализ образования структур поверхностного слоя в процессах механической обработки (рисунки 2 и 3), 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].

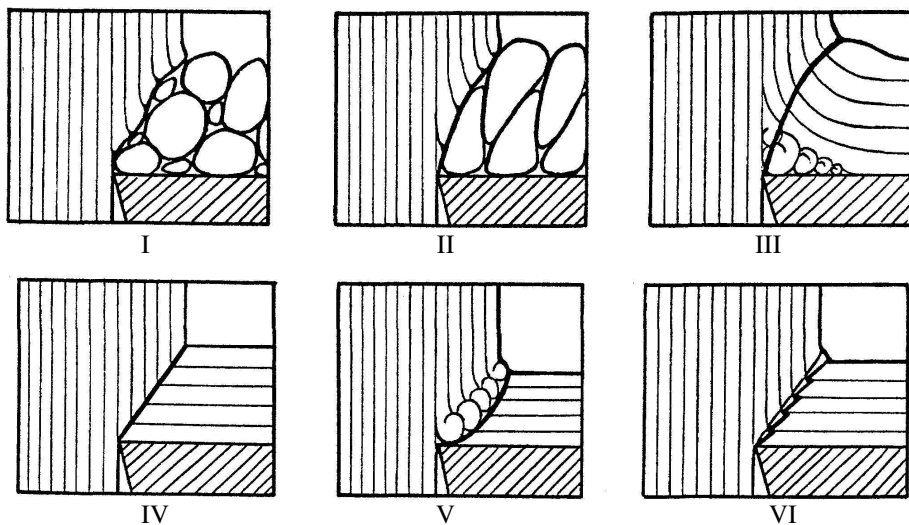


Рисунок 2. – Схемы стадий структурообразования в процессах формирования поверхности: I – хрупкое разрушение материала опережающей трещиной; II – компактирование частиц разрушения; III – вихревое образование застойных структур; IV – пластическое течение материала; V – волновое образование складок; VI – расслоение материала адиабатическими сдвигами

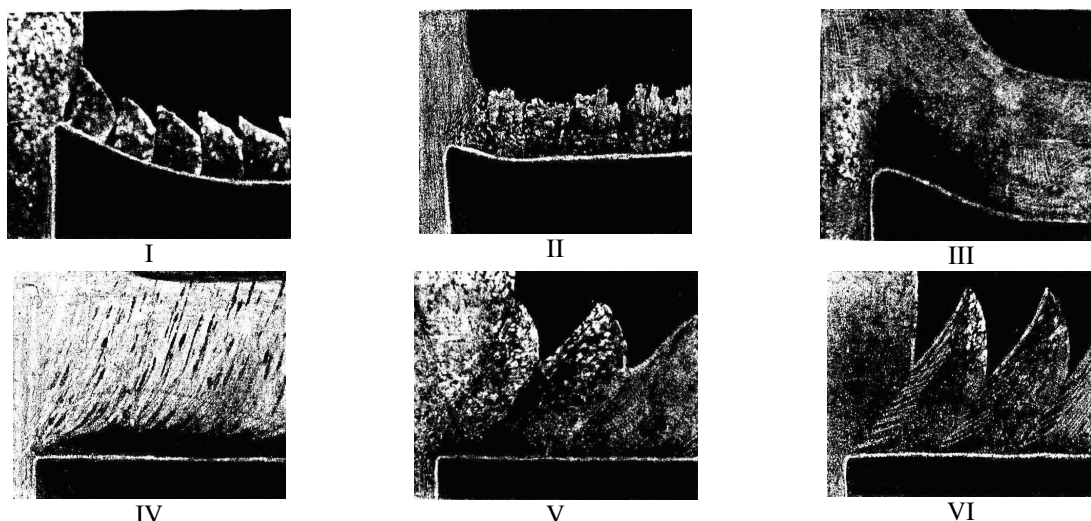


Рисунок 3. – Стружкообразование в процессах лезвийной обработки:
I – элементной стружки; II – суставчатой стружки; III – при наростообразовании;
IV – сливной стружки; V и VI – ступенчатой стружки

В процессе обработки на малой скорости при образовании опережающей хрупкой трещины скольжения (рисунки 2, I; 3, I) состояние зоны формообразования определяется давлением на технологическую среду в направлении главного движения v сжимающим напряжением σ_z , пропорциональным объемной вязкости ζ . Если σ_z превышает критическое значение, то происходит разрушение берегов трещины, а образующиеся частицы раскалываются на более мелкие [13].

В том случае, когда частицы разрушения не имеют возможности вращаться (рисунки 2, II; 3, II), они повышают составляющую трения скольжения τ_{yz} между берегами трещины и уплотняются скоплениями или элементами формирующейся суставчатой стружки при резании. Такая структура описывается соотношением (τ_{yz}/σ_z) , в котором τ_{yz} определяется в направлении геометрической суммы векторов главного движения и перемещений уплотняющихся скоплений [13].

В процессе наростообразования (рисунки 2, III и 3, III) формирование вихревых диссипативных структур [14] характеризуется соотношением (σ_{yz}/σ_z) , в котором σ_{yz} – ротационная, а σ_z – трансляционная составляющие напряженного состояния термомодеформационного процесса. При этом ротационная составляющая $\sigma_{yz} = \sigma_y \cdot \sigma_z$ определяется в направлении вектора момента формообразования поверхности [11].

Пластическое течение поверхностных слоев обрабатываемого материала или формирование сливной стружки в процессе резания (рисунки 2, IV; 3, IV) описывается составляющей сдвига τ_{yz} , характеризующей напряженное состояние вблизи условной плоскости сдвига [15].

Образование вихреподобных уплотненных структур, следующих за условной плоскостью сдвига (рисунки 2, V; 3, V), вновь определяется соотношением (σ_{yz}/σ_z) ротационной и трансляционной составляющих термомодеформационного процесса [11].

При циклических адиабатических сдвигах или формировании ступенчатой стружки в процессе резания (рисунки 2, VI; 3, VI) напряженное состояние описывается аналогично суставчатому стружкообразованию (τ_{yz}/σ_z) составляющими термопластического сдвига τ_{yz} и сжатия σ_z [16].

Образование жидкой фазы между контактирующими поверхностями характеризуется течением расплава материала с динамической вязкостью η , пропорциональной касательным напряжениям τ_{yz} между условными слоями жидкости [17].

Таким образом, кинетика процессов формирования эксплуатационных свойств изделий характеризуется циклическостью состояний структур поверхностного слоя. Учет циклических особенностей и свойств среды в процессах стружкообразования и формирования структур поверхностного слоя позволяет рациональным образом выбрать инструменты для проектируемых методов обработки.

При интенсификации процесса резания с предварительным плазменным нагревом меняются механизмы стружкообразования (см. рисунки 2 и 3).

В процессе резания хрупких высокопрочных материалов, таких как хромоникелевое покрытие после плазменной наплавки порошком ПГ-СР4, элементная стружка (см. рисунок 3, I) переходит в суставчатую (см. рисунок 3, II). При резании упругих и прочных сталей, таких как пружинная сталь 65Г, исчезают наросты (см. рисунок 3, III) и формируется сливная стружка (см. рисунок 3, IV).

В процессе резания вязких жаропрочных сплавов, таких как ЖС6К, изменяются условия циклического стружкообразования (см. рисунок 3 и 3, VI).

Изменения процессов стружкообразования сопровождаются сменой механизмов и снижением интенсивности изнашивания инструментов.

В результате изменения условий взаимодействия на контактных поверхностях инструмента происходит смена механизма его изнашивания – от абразивно-механического до окислительного и эвтектического. Это имеет отношение к инструментам с рабочей частью, оснащенной различными материалами: твердыми сплавами, минералокерамикой, поликристаллическими сверхтвердыми материалами на основе кубического нитрида бора (ПКНБ).

В качестве примера на рисунке 4 представлены контактные участки резцов, оснащенных сменными многогранными неперетачиваемыми пластинами из ПКНБ (формо-размеры пластин по ISO 1832-2014 SNMN 060300, RNMN 070300, торговая марка ПКНБ «Борсинит», производство ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины), после чистового точения образцов с покрытием из ПГ-СР4, стали 65Г и сплава ЖС6К.

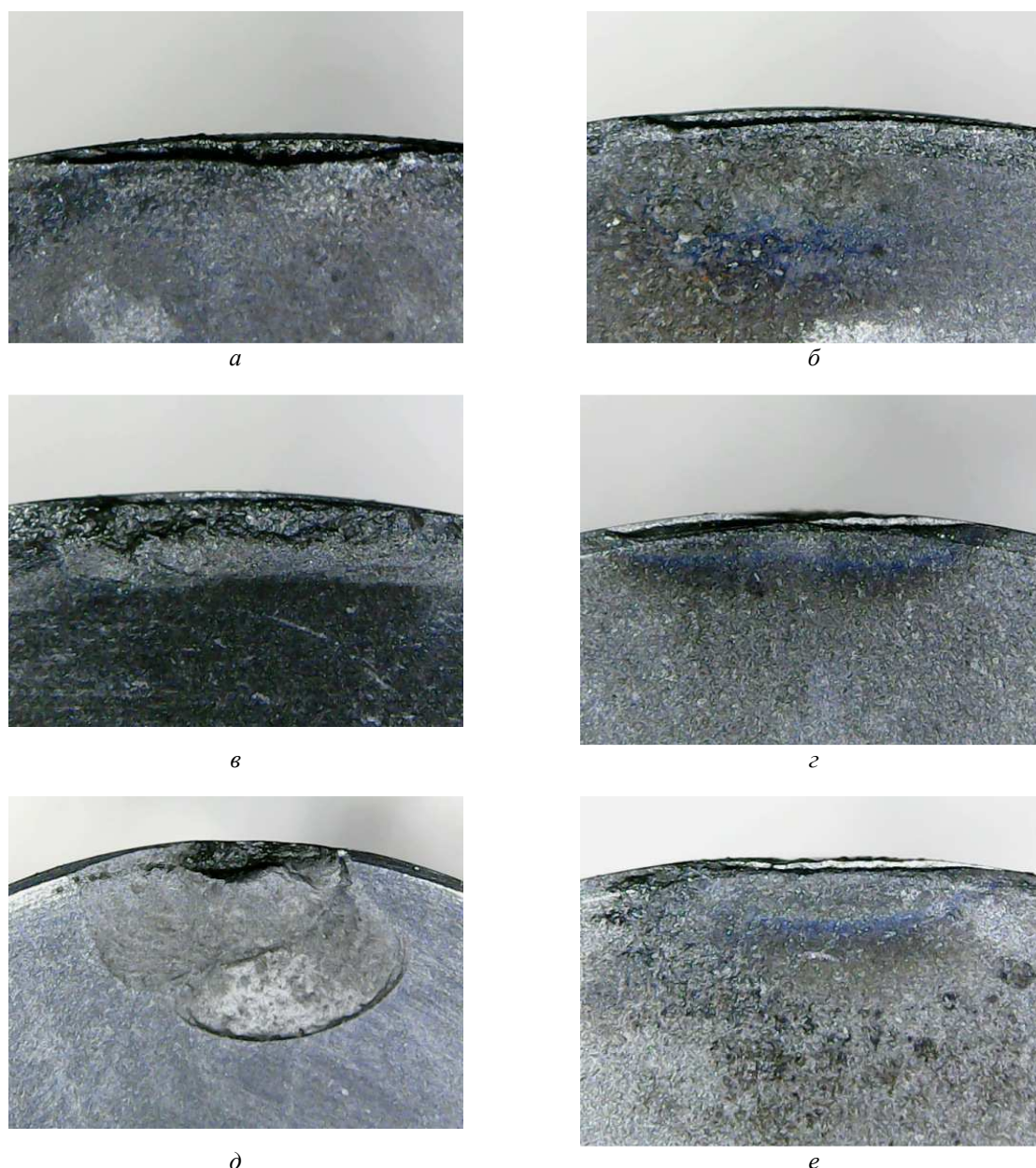


Рисунок 4. – Контактные участки инструментов после обработки покрытия из ПГ-СР4 (а, б), стали 65Г (в, г), сплава ЖС6К (д, е) без предварительного нагрева (а, в, д – $v = 90$ м/мин) и с плазменным нагревом (б, г, е – $v = 150$ м/мин): $S = 0,2$ мм/об; $t = 0,5$ мм

Необходимо отметить, что помимо снижения интенсивности изнашивания применение предварительного нагрева срезаемого слоя позволяет повысить производительность процесса обработки за счет увеличения скорости резания.

Заключение. Таким образом, с позиций единого формализма, основанного на комплексном синергетическом подходе, представлены фазовые переходы и структурообразование в металлах и сплавах при термомеханических воздействиях.

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Научные основы материаловедения / Б.Н. Арзамасов. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994. – 366 с.
2. Бочвар, А.А. Основы термической обработки сплавов / А.А. Бочвар. – М. ; Л. : Metallurgizdat, 1940. – 298 с.
3. Штейнберг, С.С. Термическая обработка стали / С.С. Штейнберг. – Свердловск ; М. : Metallurgizdat, 1945. – 154 с.
4. Гуляев, А.П. Термическая обработка стали / А.П. Гуляев. – М. : Машгиз, 1960. – 495 с.
5. Лысак, Л.И. Физические основы термической обработки стали / Л.И. Лысак, Б.И. Николин. – Киев : Техника, 1975. – 303 с.
6. Хакен, Г. Синергетика / Г. Хакен. – М. : Мир, 1980. – 404 с.
7. Олемской, А.И. Теория пространственно-временной эволюции неравновесной термодинамической системы / А.И. Олемской, И.В. Коплык // Успехи физических наук. – 1995. – Т. 165, № 10. – С. 1105–1144.
8. Анализ свойств отношений технологических решений при проектировании комбинированных методов обработки материалов / П.И. Ящерицын [и др.] // Докл. НАН Беларуси. – 2001. – Т. 45, № 4. – С. 106–109.
9. Технологическое и эксплуатационное наследование показателей качества в жизненном цикле изделий машиностроения / П.И. Ящерицын [и др.] // Докл. НАН Беларуси. – 2005. – Т. 49, № 2. – С. 111–116.
10. Использование критериев подобия при проектировании комбинированных физико-химических методов обработки материалов / А.И. Гордиенко [и др.] // Докл. НАН Беларуси. – 2004. – Т. 48, № 4. – С. 107–110.
11. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М.Л. Хейфец. – М. : Машиностроение, 2005. – 272 с.
12. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 109 с.
13. Алексеев, Н.М. О самоподобии процессов трения и изнашивания на различных масштабных уровнях / Н.М. Алексеев // Трение и износ. – 1992. – Т. 13, № 1. – С. 161–171.
14. Лихачев, В.А. Введение в теорию дисклинаций / В.А. Лихачев, Ю.Р. Хайров. – Л. : ЛГУ, 1975. – 183 с.
15. Силин, С.С. Метод подобия при резании металлов / С.С. Силин. – М. : Машиностроение, 1979. – 152 с.
16. Талантов, Н.В. Физические основы процесса резания и износа инструмента / Н.В. Талантов. – Волгоград : ВолгПИ, 1988. – 129 с.
17. Клименко, С.А. Режущий инструмент из ПСТМ на основе нитрида бора / С.А. Клименко, Ю.А. Муковоз, Л.Г. Полонский. – Киев : Знання, 1994. – 36 с.

Поступила 27.09.2018

SELF-ORGANIZATION OF STRUCTURE FORMATION PROCESSES AT INTENSIVE TREATMENT AND EXPLOITATION OF MATERIALS

A. GORDIENKO, M. KHEIFETZ, T. ALEKSEEVA,
S. KLYMENKO, M. KOPIEIKINA

The analysis of the self-organization of structures under intensive technological influences was carried out by selecting order parameters for processing materials with determining the stability of the state regimes of the thermodynamic system. The ways of intensifying the processes of structure formation during the processing of materials and the stabilization of the structures being formed that implement the combination of control parameters of pressure and thermal effects are proposed.

Keywords: technological influences, thermodynamic system, processes of structure formation, thermal effects.