

## УДК 621.91



**Н.В. Вереzub,**  
д-р техн. наук, проф.,  
Национальный  
технический  
университет  
«Харьковский  
политехнический  
институт»  
hightech@kpi.kharkov.ua



**А.А. Симонова,**  
канд. техн. наук,  
Кременчугский  
национальный  
университет  
им. М.В. Остроград-  
ского,  
secr@kdu.edu.ua

## ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ИЗДЕЛИЙ С НАНО- И СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

*А.А. Симонова, М.В. Вереzub. Жизненный цикл виробів із нано- та субмікрористалічною структурою.* Розроблена модель еволюції наноструктурного стану на стадіях життєвого циклу деталей. Запропоновано класифікатор об'ємних нанокристалічних конструкційних матеріалів та технологій їх отримання.

*A.A. Symonova, N.V. Verzub. The life cycle of the products with nano- and submicrocrystalline structure.* The model of the of nanocrystalline state evolution on the life cycle parts is developed. Classifier of the bulk nanocrystalline construction materials and the production technologies is proposed.

В настоящее время особое внимание уделяется вопросам разработки новых материалов. Одним из наиболее перспективных и практически ценных направлений использования нанотехнологий является получение изделий и полуфабрикатов из металлов и сплавов, структура которых доведена до такого уровня, что ее составляющие – зерна – имеют один или несколько размеров порядка нескольких сотен или даже десятков нанометров. Такие материалы имеют качественно новый уровень механических свойств, достичь которых традиционными методами термической, химико-термической и пластической обработки не возможно. Кроме того, эти материалы сохраняют пластичность и вязкость при увеличении в несколько раз показателей прочности и износостойкости.

В настоящее время разработан ряд эффективных методов получения материалов с ультрамелкими зернами, как для исследовательских, так и для промышленных целей [1...4].

Разработка и усовершенствование процессов получения и синтеза объемных наноструктурных материалов значительно упрощается разработкой классификации этих процессов.

Признаки, по которым проводится классификация, могут быть следующими: метод и способы получения; вид-форма получаемого полуфабриката; вид исходной энергии и т.д.

Методы и способы получения нанокристаллических материалов конструкционного предназначения можно охарактеризовать функцией  $X$ .

Разобьем бесконечность методов и способов на четыре подмножества, каждое из которых состоит из более мелких

$X_{11}$  – компактирование нанопрошков прессованием и спеканием;

$X_{12}$  – компактирование нанопрошков спеканием под давлением;

$X_{13}$  – компактирование нанопрошков в процессе высокотемпературного самораспространяющегося синтеза;

$X_{21}$  – кристаллизация аморфных сплавов кристаллизацией;

$X_{22}$  – кристаллизация аморфных сплавов консолидацией аморфных порошков с последующей кристаллизацией;

$X_{31}$  – интенсивная пластическая деформация (ИПД) при равноканальном угловом прессовании;

$X_{32}$  – ИПД кручением при высоком давлении (наковальня Бриджемена).

$X_{33}$  – ИПД при всесторонней ковке;

$X_{41}$  – методы нанесения наноструктурных покрытий – электролитическое осаждение;

$X_{42}$  – методы нанесения наноструктурных покрытий – химическое осаждение;

$X_{43}$  – методы нанесения наноструктурных покрытий – физическое осаждение;

$X_{44}$  – методы нанесения наноструктурных покрытий – взрывное плакирование.

Реализация технологических процессов получения разных нанокристаллических материалов может проводиться при использовании различных источников энергии для деформирования и консолидации. Их можно охарактеризовать функцией  $B$  и соответственно:

$B_{10}$  – электроэнергия;  $B_{12}$  – электрогидравлический эффект;  $B_{13}$  – магнитно-импульсное нагружение.

$B_{20}$  – химическая энергия взрывных веществ  $B_{21}$  – метательных;  $B_{22}$  – бризантных.

$B_{30}$  – химическая энергия детонирующих газовых смесей.

$B_{40}$  – энергия сжиженных газов.

$B_{50}$  – механическая энергия.

В последних трех индекс варьируется в рамках используемых газов, а в последнем – вид привода.

Инструмент характеризуем в границах каждой бесконечности технологий дискретных функций, которая включает его предназначение и материал, из которого он изготовлен:  $M_{10}$  – матрица;  $M_{20}$  – пресс-форма;  $M_{30}$  – волока;  $M_{40}$  – пуансон.

Вид-форма получаемого полуфабриката характеризуется функцией  $\beta_{ij}$ :  $\beta_{1j}$  – сплошной тонкостенный:  $\beta_{11}$  – лист;  $\beta_{12}$  – труба;  $\beta_{13}$  – профиль;  $\beta_{14}$  –

лист профільний;  $\beta_{2j}$  – сплошної об'ємний:  $\beta_{21}$  – пруток;  $\beta_{22}$  – фасонна заготовка;  $\beta_{23}$  – пуста об'ємна заготовка;  $\beta_{3j}$  – дискретний:  $\beta_{31}$  – гранули;  $\beta_{32}$  – низкодисперсний порошок;  $\beta_{33}$  – вискодисперсний порошок;  $\beta_{34}$  – нанопорошок.

В класифікатор також слід внести вид, получаемых матеріалів,  $\lambda_k$ :  $\lambda_1$  – мікроткристалічні (МК) матеріали з розміром зерен 1...10 мкм;  $\lambda_2$  – субмікроткристалічні (СМК) – 0,1...1 мкм  $\lambda_3$  – нанокристалічні матеріали – 10...100 нм.

Получаемые нанокристалічні матеріали по своєму складу характеризуються функцією  $S_m$ :  $S_1$  – металічні матеріали;  $S_2$  – кераміка;  $S_3$  – кермети;  $S_4$  – композиційні матеріали;  $S_5$  – полімери;  $S_6$  – аморфні металічні матеріали.

Рассмотренный класифікатор охоплює великий комплекс методів отримання наноструктурних матеріалів конструктивного призначення. Його використання ефективно при побудові системи вибору прийнятної технології і систематизації методів виробництва наноструктурних матеріалів.

Размер зерен, морфологія і текстура можуть змінюватися в залежності від відповідних технологічних параметрів процесу отримання наноматеріалів. С зменшенням розміру зерен об'ємна частка меж розділу (меж зерен і трійних стыків) значно зростає, вони мають значне вплив на властивості наноматеріалів. Об'ємна частка трійних стыків значно зростає при розмірах зерен менше 10 нм. Особливості структури нанокристалічних матеріалів (розмір зерен, частка меж розділу і їх стан, пористість і інші дефекти структури) визначаються методами отримання і мають суттєвий вплив на їх властивості. С зменшенням розміру зерна збільшується міцність, в тому числі з збереженням пластичності, проявляється ефект низкотемпературної і високоскоростної надпластичності [3].

Получены експериментальні результати, характеризуючі залежність механічних і експлуатаційних властивостей виробів від режимів наноструктурування.

При отриманні наноматеріалів з допомогою порошкової металургії важливим фактором формування наноструктури є температура спекання, яка з зменшенням розміру частинок порошоків значно зменшується. Спекання нанопорошків без тиску при порівняно низьких температурах не дозволяє отримати матеріал з малим розміром зерна без пор. При високих же температурах густина зразків зростає, але збільшується розмір зерна.

Последние годы ознаменовались растущим интересом к развитию методов интенсивной пластической деформации для получения нанокристаллических и субмикрокристаллических металлов и сплавов.

Исследования, проводимые на чистых металлах (Cu, Ti, Ni, Fe), а также на сплавах (на основе Al, Mg, Ti и сталей), позволяют выделить и обосновать несколько правил обработки методами ИПД, необходимых для формирования СМК – структуры в металлических материалах и обеспечивающих достижение их улучшенных свойств. Эти основные правила относятся как к выбору режимов и маршрутов обработки ИПД, так и к исследуемому материалу.

Весьма важным требованием к обработке методами ИПД является проведение деформирования при низких температурах (как правило, меньше  $0,47T_{пл}$ ). Только в этих условиях возможно достижение высокой плотности дислокации  $10^{14} \text{ м}^{-2}$  и выше вплоть до предельных значений  $10^{16} - 10^{17} \text{ м}^{-2}$  [5], что необходимо для формирования СМК – структуры. Повышение температуры обработки ведет к резкому уменьшению плотности дислокаций и увеличению ( $> 1 \text{ мкм}$ ) размера зерен.

Большинство изделий для промышленности получают путем механической обработки. Резание представляет собой сложный процесс пластической деформации с высокими температурами, силами и деформациями в зоне стружкообразования. Для изучения влияния факторов механической обработки на физико-механические свойства, обрабатываемость и качество поверхностного слоя, полученного вследствие процесса резания металлов с НК и СМК структурой, необходимо знать особенности структуры металла, полученного методом ИПД. Рост зерна в металлах с НК и СМК–структурой, образованной при большой пластической деформации, начинается при более низких температурах ( $0,2-0,3T_{пл}$  [6]), чем в крупнокристаллических металлах. Причиной начала роста зерен в нанокристаллах при относительно низких температурах являются не только малый размер зерен, но, прежде всего, повышенная подвижность границ зерен, обусловленная низкой энергией активации зернограничной диффузии.

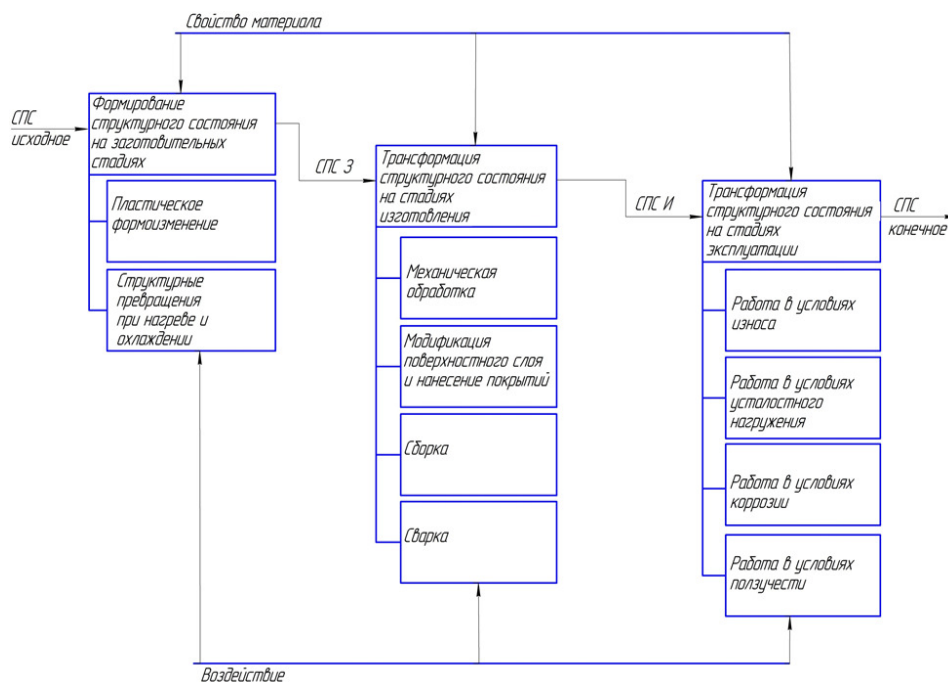
Изучение закономерностей изменения структуры НК и СМК металлов и определение факторов, оказывающих наибольшее влияние на интенсивность процесса рекристаллизации, позволит обозначить факторы процесса резания, которые будут влиять на стабильность обрабатываемых заготовок из НК и СМК металлов.

Такими факторами служит температура в зоне резания, пластические деформации, остаточные напряжения. Факторами, оказывающим наибольшее влияние на интенсивность роста размера зерна, являются температура в зоне резания и время воздействия этой температуры. Для начала процесса рекристаллизации важным аспектом является состояние исходной структуры (размер зерна, плотность дислокаций на границах зерен, дальнедействующие внутренние напряжения, степень искажения кристаллической решетки). Об-

наруженные уникальные свойства наноструктурных материалов способствуют их практическому использованию.

Однако уровень сегодняшних знаний в области технологического обеспечения эксплуатационных свойств изделия наноструктурированием не позволяет в полной мере использовать эти методы для инженерных приложений.

Известно, что в процессе эксплуатации под действием силовых, температурных и других факторов может происходить трансформация структурного состояния. При этом вопросы стабильности наноструктурного состояния, закономерностей его эволюции практически не исследованы. Также практически отсутствуют методы аналитической оценки параметров структурного состояния при варьировании режимов и схем реализации методов наноструктурирования.



*СПС исходное* – состояние поверхностного слоя исходное; *СПС З* – состояние поверхностного слоя заготовки; *СПС И* – состояние поверхностного слоя изделия; *СПС конечное* – состояние поверхностного слоя детали в процессе эксплуатации.

*Рис. 1. Технологическое наследования нанокристаллического состояния поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла изделий*

Для проектирования упрочняющих технологических процессов, основанных на наноструктурировании и обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства изделий, требуется разработка аналитического аппарата, по-

звolyающего оценивать параметры структурного состояния на всех этапах жизненного цикла (рис.1).

Разработка такого аппарата возможна путем разработки теории механики технологического наследования. В соответствии с основными положениями механики технологического наследования на каждой стадии нагружения в поверхностном слое изделия происходит непрерывное накопление деформации и исчерпание запаса пластичности [7].

Основная идея развития механики наследования в направлении описания эволюции наноструктурированного состояния изделия заключается в установлении наследственных закономерностей формирования параметров структурного состояния под действием нагружений.

Реализация предложенного подхода к описанию наноструктурированного состояния позволит прогнозировать и контролировать состояние материала изделия на всех этапах жизненного цикла, с учетом факторов оказывающих наибольшее влияние на интенсивность эволюции структуры материала. Учет явления технологического наследования позволит обеспечить создание изделий с заведомо высокими эксплуатационными характеристиками.

### Литература

1. Introduction to Nanoscience / G. Hornyak, J. Dutta, H. Tibbals, A. Rao. – N.Y.: CRC Press, 2008. – 815p.
2. Siegel R.W. Mechanical properties of ultrafine grained materials / R.W. Siegel, M. Nastasi, D.M. Parkin, H. Glieter // Proc. Of NATO ASI. – Dordrecht – Boston – London: Kluwer Head. Publ., 1993. – V.233. – P. 509–512.
3. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения: учеб. пособие / Б.М. Балоян, А.Г. Колмаков, М.И. Алымов и др. – М.: АгроПрессДизайн, 2007. – 102 с.
4. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные методом интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
5. Gleiter H. Nanocrystalline materials / H. Gleiter // Prog. Mater. Sci. – 1989. – №33. – P. 223-330.
6. Смирнова Н.А. Особенности низкотемпературной рекристаллизации никеля и меди / Н.А. Смирнова, В.И. Левит, В.П. Пилюгин и др. // ФММ. – 1986. – Т. 62, Вып. 3. – С. 566-570.
7. Кречетов А.А. Функциональная модель технологического наследования наноструктурированного состояния поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла деталей машин / А.А. Кречетов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – №12. – С. 10-15.