

## НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ НАНОПОРОШКОВ МОНОКАРБИДА ВОЛЬФРАМА

Розглянуто проблему гарячого пресування нанопорошків з монокарбиду вольфрама. Визначено механізм консолідації нанопорошків під додатковим впливом електричного струму.

The problem of a tungsten monocarbide hot pressing is investigated. The mechanism of consolidation for nanopowders under additional influence of the electric current is defined.

В настоящее время вопросы консолидации нанопорошков, в частности тугоплавких материалов инструментального назначения, актуальны тем, что именно этим процессом обеспечивается структура полученного материала, а следовательно и его физико-механические свойства. На наш взгляд, из всех методов компактирования нанопорошковых материалов для тугоплавких порошков именно метод горячего прессования с прямым пропусканием тока является наиболее эффективным. Эту точку зрения объясняет ряд факторов: возможность быстрого нагрева графитовой формы до высокой температуры; относительная простота установки и возможность использования обычного переменного тока промышленной частоты, что исключает использование дорогостоящих импульсных генераторов; возможность получения заготовок относительно большого размера; быстрый нагрев позволяет ограничить интенсивный рост нанозерен исходного порошка, оставляя их размеры в нанопределах.

Если процесс влияния электрического тока на спекание металлических порошков достаточно исследован [1], то процесс горячего прессования с применением электрического тока при спекания нанопорошков, несмотря на многочисленные зарубежные публикации в области спекания этих порошков, изучен мало, особенно в части механизмов спекания порошков тугоплавких соединений, без которых практически невозможно представить современную инструментальную промышленность. Процессы спекания обычных порошков тугоплавких соединений подробно рассмотрены в работе [2]. Авторами [3, 4] изучены закономерности спекания различных неметаллических нанопорошков, в том числе тугоплавких соединений.

В данной статье представлены некоторые результаты исследования закономерностей механизмов спекания нанопорошков монокарбида вольфрама в процессе горячего прессования в графитовых формах при

пропускании через порошок электрического тока. Ранее проведенные исследования показали, что можно получить материал с высокими физико-механическими свойствами [5]. Очевидно, что на контактных участках между соседними частицами под влиянием большого электрического тока должен происходить интенсивный массоперенос. В результате в порошковых прессовках идет процесс быстрого спекания. В зависимости от параметров процесса (давление, сила тока, напряжение, скорость нагрева, время нагрева) ход спекания может происходить по-разному. В связи с этим в широких пределах могут изменяться структура и свойства материала.

Как показали предварительные эксперименты, из нанопорошков монокарбида вольфрама (40-70 нм) можно получить практически беспористый материал с относительно высокими физико-механическими свойствами [5].

Предварительно таблетированный порошок карбида вольфрама подвергался спеканию в установке со специальной вакуумной камерой. Максимальное давление для используемого графита МПГ-7 около 20 кН при температуре выше 1200°C, поэтому максимальное усилие для пресс-формы d=20 мм создавали не более 15 кН. Температура прекращения усадки составила 1650 °C. Плотность образцов после шлифования поверхности определяли гидростатическим взвешиванием, а сколы на их поверхности, как и вид порошка, растровым электронным микроскопом JSM-840. Полученный материал показал высокую твердость и плотность. Некоторые свойства полученных образцов при различных эффективных режимах горячего прессования приведены в табл.1. Как показали эксперименты, оптимальные режимы находятся в довольно узких пределах, в частности наиболее определяющий из них температурный фактор 1700-1800 °C. Давление горячего прессования лимитируется прочностью графитовой пресс-формы при данных температурах, а оптимальная скорость подъема температуры находится в пределах 400-500°C/мин, хотя с целью предупреждения поломки формы до 900°C температура поднималась более плавно, со скоростью 50-250 C/мин.

Таблица 1 – Некоторые физико-механические свойства полученных образцов

N	P, МПа	T, °C	$\rho_{отн}$	HRA	$\sigma_{изг}$ , МПа	$d_{cp}$ , мкм
1	40,0	1700	96,2	93	530	0,350
2	50,0	1730	99,0	95	720	0,420
3	50,0	1800	99,2	95	670	0,750

Процесс спекания сопровождается рядом явлений, которые нами фиксировались с помощью различных приборов и инструментов. Наблюдение за этими явлениями и за их изменением при изменении технологических параметров позволяет управлять процессом спекания в требуемом направлении с целью получения материалов с заданным уровнем свойств, обеспечивающим получение изделия заданных формы и размеров.

Тугоплавкое тело монокарбида вольфрама сочетает высокую твердость и повышенную хрупкость. Усадка заготовок, как правило, сопровождается уменьшением количества дефектов кристаллической структуры, шероховатости поверхности частиц, пористости, а также ростом зерен и гомогенизацией. Непосредственно к самому процессу спекания можно отнести только два явления: рост площади контакта между частицами и сближение центров частиц, т.е. собственно усадку, остальные перечисленные явления являются сопутствующими.

Как известно, спекание приближает систему, состоящую из отдельных частиц, к термодинамическому равновесию, т.е. это процесс, в ходе которого избыточная энергия системы уменьшается. Можно предположить, что именно эта энергия свободной поверхности, поверхности границ и дефектов кристаллической решетки является главной движущей силой спекания. Величину этой движущей силы можно оценивать, учитывая размеры частиц, из которых сформована заготовка. Например, удельная поверхность порошков карбидов после размола обычно составляет 1-5 м<sup>2</sup>/г, порошков, полученных плазмо-химическим синтезом, – 10-40 м<sup>2</sup>/г [2]. Если принять, что в результате любого метода формования получают заготовки пористостью 40 %, то очевидно, что избыточная энергия такой системы достаточно велика. Она и выполняет основную работу по уплотнению, вызывая течение вещества в пустоту (поры). С некоторым приближением, следуя авторам [2], можем допустить, что течение вещества к поверхности с отрицательной кривизной осуществляется под некоторым эффективным давлением  $P_{э.н.}$  вызываемым поверхностным натяжением:

$$P_{э.н.} = 2\gamma / r, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – свободная поверхностная энергия, кДж/мкм<sup>2</sup>;  $r$  – размер зерна, мкм.

Это давление достаточно велико для прессовки из нанодисперсных частиц, где размер пор сопоставим с размером частиц. Эквивалентное давление, действующее по крайней мере в начальный период спекания, для нанодисперсных порошков очень велико и, естественно, вызывает быстрое уплотнение  $\dot{\epsilon}$ , например, по механизму ползучести:

$$\dot{\epsilon} = A P_{э.н.}^v \exp(-E_{ан}/RT), \quad (2)$$

где  $A$ ,  $R$ ,  $v$  – постоянные;  $E_{ан}$  – энергия активации ползучести, кДж.

Другой движущей силой процесса уплотнения, наряду с избыточной энергией, является энергия границы раздела зерен, отделяющая участки нанозерен с различной ориентацией друг от друга. Следует учитывать, что при нагревании вначале между частицами в прессовке образуется физический контакт и в дальнейшем – разветвленная система границ, т.е. вначале свободная поверхностная энергия, вызывая уплотнение системы, тратится также на образование границ, избыточная энергия которых в дальнейшем является движущей силой процесса спекания. Образование разветвленной системы границ происходит в результате термически активированного скольжения по границам зерен в начальный период спекания. Поэтому при медленном нагреве до температуры спекания между частицами образуются совершенные плоские границы малой протяженности, и уплотнение протекает очень медленно, что ведет к росту зерна. И наоборот, в результате быстрого нагревания по механизму термически активированного скольжения по границам нанозерен, в результате того, что поверхность раздела границ на порядок меньше поверхности нанопорошка, дальнейшее уплотнение прессовки протекает по подобному реализации механизма ползучести характеру (2), но значительно быстрее:

$$\dot{\epsilon} = A_1 P_{э.г.}^v \exp(-E_{ан}/RT), \quad (3)$$

где  $P_{э.г.}$  – эффективное давление, обусловленное сокращением поверхности раздела границ,  $P_{э.г.} \ll P_{э.н.}$ .

Следующей движущей силой спекания является энергия несовершенств кристаллической решетки. Она служит причиной ускоренного обмена мест:

$$n_a = n_0 \exp(-E_{анн}/RT), \quad (4)$$

где  $n_a$  – число атомов, которые покинули свое место в решетке и заняли вакансионный узел;  $n_0$  – структурный фактор, не зависящий от температуры;  $E_{анн}$  – энергия активации аннигиляции дефектов, кДж. Эта величина в нарушенной решетке сильно понижается. Поэтому для активного уплотнения материала необходимо по возможности сильно нарушить структуру, измельчая вещество, что и происходит в нанопорошках, полученных плазмо-химическим способом. В процессе спекания количество несовершенств кристаллической решетки значительно уменьшается. Так, например, в монокарбиде вольфрама с удельной поверхностью до 1м<sup>2</sup>/г размер когерентных областей составляет 20000–50000 нм, а после спекания при температуре 0,8  $T_{пл}$  составляет уже 200000–500000 нм.

Кроме того, было замечено, что при спекании в момент прохождения электрического тока достаточно большой величины (до 5000-8000 А) в зонах

межчастичных контактов возникают электрические разряды, которые согласно физике этого процесса должны вызвать образование плазмы, что естественно приводит к очистке и активизации поверхности спекаемых порошков. Очистка поверхности частиц порошка в свою очередь приводит к образованию чистых границ зерен и активации самого процесса спекания. Например, автором [3] обнаружено, что при спекании нанопорошков Al, которые имеют на поверхности неоднородный слой  $Al_2O_3$ , толщиной около 5 нм, этот слой был удален образовавшимся электрическим полем, в результате чего порошок был уплотнен до теоретической плотности данного материала. Следует отметить, что в этом случае применялся импульсный ток высокой частоты.

Таким образом, проведенные исследования позволяют предположить, что относительно высокие физико-механические свойства полученных образцов из нанопорошков монокристалла вольфрама обуславливаются, в первую очередь, высокодисперсными зёрнами и прочными границами между ними, что обеспечивается высокой скоростью подъема температуры до  $1700^\circ C$  в процессе горячего прессования в графитовых формах.

Данные исследования позволяют предположить, что метод горячего прессования нанопорошков при нагревании прямым пропусканием переменного тока ускоряет поток вакансий на поверхности пор, а быстрое уменьшение пористости на границах зерен ведет к термически активированному скольжению нанозерен друг относительно друга, что в конечном итоге, вместе с наложением переменного электрического поля, обеспечивает лучшую укладку зерен, и, следовательно, обеспечивает их более быстрое уплотнение. В то же время, наблюдения за усадкой нанопорошковых образцов при горячем прессовании с прямым пропусканием тока при температурах до  $900-1000^\circ C$  позволяют предположить, что первоначальным механизмом уплотнения (консолидации) является механизм ползучести.

Список литературы: 1. Райченко А.И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока – М.: Металлургия, 1987. – 128 с. 2. Кислый П.С., Боднарук Н.И., Горичок Я.О. и др. Физико-химические основы получения тугоплавких сверхтвердых материалов – Киев: Наук. думка, 1986. – 208 с. 3. Groza J.R. International Developments in Rapid Consolidation Techniques and Commercial Status. Fine, Ultrafine and Nanopowders, 98, New York, November 8-9, 1998. 4. Скороход В.В., Уварова А.В., Рагуля А.В. Фізико-хімічна кінетика в наноструктурних системах. – Київ, 2001. – 180 с. 5. Kodash V.Y., Gevorkian E.S. Tungsten carbide cutting tool materials. United States Patent No.6617271.

*Поступила в редколлегию 15.05.2008*

**УДК 621.924**

*В.А. ЗАЛОГА, К.А. ДЯДЮРА, В.В. НАГОРНЫЙ*

## **УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ, ПОЛУЧАЕМОЙ МЕТОДАМИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ**

В роботі розглянуті питання прогнозування фактичного ресурсу різального інструменту та управління на основі цього параметрами режиму різання. Показано, що з цією метою можна успішно використати методи, що застосовуються в технічній діагностиці.

Effectively to manage the cutting mode it is possible to carry out due to the use of method of technical diagnostics of machines for determination of actual resource of instrument.

**Введение.** Конкуренентоспособность машиностроительного производства в современных условиях международной интеграции и глобализации мировой экономики все в большей степени определяется применением новейших технологий, способных обеспечить сокращение времени разработки нового изделия, освоения его производства и вывода на рынок.

Получение изделий, отвечающих требованиям потенциальных потребителей, во многом будет зависеть от нетрадиционных конструкторских и технологических решений, использования последних достижений в различных областях науки, техники, информатики и материаловедения.

Наличие целого ряда признаков, отражающих достижения различных отраслей знаний, приводит к объединению усилий на этапах жизненного цикла (ЖЦ) изделия все более широкого круга предприятий, каждое из которых концентрируется на своей основной компетенции.

За прошедшее десятилетие в современном машиностроении произошли значительные изменения, которые связаны в первую очередь с компьютеризацией производственных процессов и использованием микропроцессорных систем для управления процессами резания. В настоящее время при резком сокращении количества высококвалифицированных рабочих-станочников это становится весьма актуальным.

Введение в станок дополнительных управляющих функций позволяет с помощью специальных датчиков получать информацию о состоянии заготовки (обрабатываемой детали), инструмента, станка и непрерывно использовать ее для адаптивного управления процессом резания. Этим сразу разрешается несколько проблем, в частности, повышается производительность процесса обработки, точность и качество поверхностей изготавливаемых деталей. Все это приводит к снижению издержек машиностроительного производства и позволяет, в конечном итоге, решать одну из важнейших задач управления ЖЦ изделия на этапе его изготовления: выпуск конкурентоспособной продукции.