

Применение комплекса “Тензор” для исследования Cu—Cr материалов для контактов вакуумных выключателей

А. И. Хоменко, Е. В. Хоменко

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича
НАН Украины, Киев

С помощью аппаратно-программного комплекса “Тензор” выполнено исследование порошковых композитных материалов (50% (мас.) Cr—50% (мас.) Cu), полученных спеканием в присутствии жидкой фазы, статическим и динамическим горячим прессованием. Предпринята попытка объяснить механические свойства материалов особенностями характеристик микроструктур. Установлено отклонение некоторых закономерностей поведения материалов от прогнозируемых на основе концепции сплошного тела.

Ключевые слова: *аппаратно-программный комплекс, порошковый Cr—Cu композит, спекание в присутствии жидкой фазы, статическое и динамическое горячее прессование, микроструктура.*

Если для однофазных систем взаимосвязь отдельных физических свойств материала и его микроструктуры исследована относительно давно [1], то для многофазных материалов, таких как Cu—Cr композиты, установление такой взаимосвязи остается проблемным. Даже для нахождения частных решений проблемы необходимо выполнить значительный объем экспериментальных исследований с последующей обработкой больших массивов данных. На конечный результат оказывают влияние как погрешности испытательной аппаратуры, так и ошибки при регистрации данных и их обработке, в частности при вводе данных в счетно-решающие устройства, округлении промежуточных результатов и т. п. Поскольку датчики физических величин и измерительные приборы достигли определенного уровня совершенства, качественно нового уровня исследований можно достигнуть за счет новых средств регистрации и обработки результатов испытаний материалов. Одним из способов создания таких средств является объединение испытательных машин, измерительных приборов и счетно-решающих устройств в единый вычислительный комплекс. При этом необходимость в регистрирующих приборах либо вовсе отпадает, либо их функция сводится к вспомогательной, поскольку мощность и функциональность современных персональных компьютеров (ПК) достаточны для регистрации, визуализации и обработки данных, полученных при испытаниях материалов. Погрешности при регистрации и передаче данных минимизируются за счет непосредственного ввода сигналов датчиков физических величин в компьютер и автоматизации их обработки.

© А. И. Хоменко, Е. В. Хоменко, 2010

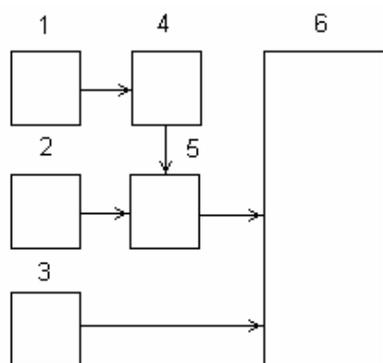


Рис. 1. Структурная схема аппаратной части комплекса “Тензор”.

В настоящей работе рассмотрен один из вариантов построения такого комплекса и приведены некоторые результаты его применения для исследования структурно-зависимых свойств Cr—Cu материалов.

Аппаратно-программный комплекс “Тензор” [2] предназначен для исследования механических свойств и анализа микроструктур порошковых материалов. В состав аппаратной части комплекса (рис. 1) входят тензодатчик 1, датчик перемещения 2, цифровая фотокамера 3, преобразователь напряжение-частота 4, двухканальный аналого-цифровой преобразователь 5 и ПК 6.

Тензодатчик (месдоза) предназначен для измерения осевого усилия, прилагаемого к испытываемому образцу. Для снижения уровня наводок электромагнитного поля промышленной частоты и коммутационных помех при включении и выключении испытательных машин использовано питание месдозы переменным током повышенной (более 1000 Гц) частоты с последующей фильтрацией выходного сигнала по высокой частоте, усилением по переменному току и выпрямлением. Датчик перемещения представляет собой катушку переменной индуктивности, включенную в схему индуктивно-емкостного генератора. Частота генератора однозначно зависит от положения сердечника катушки, жестко соединенного с подвижной плитой испытательного пресса (подвижного захвата разрывной машины). Для минимизации погрешности датчика измеряется не абсолютная позиция, а разность позиций, то есть собственно перемещение. Частоту выходного сигнала датчика определяют по количеству его периодов на фиксированном интервале времени. Для унификации методов обработки сигналов использовано преобразование выходного напряжения тензодатчика в частоту, за счет чего собственно цифровое преобразование сводится к подсчету числа периодов выходного сигнала преобразователя за фиксированный интервал времени (для статических испытаний — 100 мс). Соответственно, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) представляет собой двухканальный счетчик импульсов с буферными цепями, реализующими ввод данных в компьютер через параллельный интерфейс. Возможна работа комплекса без датчика перемещения. В этом случае исходная диаграмма испытания строится в координатах время—осевое усилие, которые затем преобразуются в стандартные деформация-напряжение в предположении равномерного перемещения плит испытательного пресса или захватов разрывной машины (неравномерность нормируется и приводится в паспортных данных на соответствующую машину и, как правило, мала). Непосредственный ввод данных в ПК дает возможность строить диаграммы испытаний материалов и сразу рассчитывать необходимые механические характеристики, то есть объединить функции

регистрирующего и счетно-решающего приборов, а также средства визуализации процесса испытаний. Для ввода данных в ПК и реализации указанных функций разработана программа “Тензор”, которая в заданные моменты времени считывает данные с одного или обоих каналов АЦП через параллельный интерфейс и накапливает их в файле. Одновременно на экране монитора ПК отображается диаграмма испытаний. На первом этапе создания комплекса пользователь управляет испытательной машиной вручную, руководствуясь характером диаграммы испытаний. Возможность обрабатывать диаграмму “на лету” принципиально позволяет в ходе испытаний определять характерные участки и управлять испытательной машиной с помощью ПК, предварительно задавая момент окончания испытаний. Это может быть разрушение образца либо достижение некоторого предельного значения осевого усилия. Накопленные в процессе испытания данные, описывающие диаграмму испытаний, используются для ее сглаживания и расчета механических характеристик материала (при испытаниях на сжатие — согласно ГОСТ 25.50397). Результаты представляются в виде текстово-графического документа стандартного формата HTML. Для сравнения результатов испытаний нескольких образцов в комплекс входит программа “Тензор-Граф”, позволяющая объединить в одних координатных осях несколько диаграмм испытаний. Это в ряде случаев облегчает нахождение зависимостей механических характеристик, например, от состава, режима термообработки, технологии получения материала и т. п. Для выявления зависимости механических характеристик материала от его структуры в состав комплекса включена программа обработки изображений “АМИС” [3], дополненная модулями исследования распределения линейных и угловых размеров частиц, определения деформаций микроструктурным методом и измерения микротвердости. Функциональность текущей версии комплекса “Тензор” позволяет осуществить углубленное по сравнению с традиционными средствами исследование свойств материалов.

Для проверки эффективности применения комплекса к многофазным системам с его помощью был исследован порошковый материал одинакового состава (50% (мас.) Cr—50% (мас.) Cu), но полученный разными методами: жидкофазным спеканием (ЖФС), статическим (СП) и динамическим (ДП) горячим прессованием.

Цель настоящего исследования — объяснить механические свойства материалов особенностями микроструктуры и проверить отклонение некоторых закономерностей поведения материалов от прогнозируемых на основе концепции сплошного тела.

Для проведения исследований изготовили образцы в виде прямоугольных параллелепипедов, предполагая испытать их на сжатие. Считается, что испытание на сжатие менее информативно, чем испытание на растяжение, но с учетом реальных условий работы дугогасительных контактов вакуумных выключателей (на этапе коммутации тока в цепи — в условиях осевого сжатия [4]) и в предположении применимости методики комплексных испытаний для экспресс-контроля такой выбор вполне оправдан.

Сглаженные диаграммы испытаний приведены на рис. 2. Все три материала пластичны, деформируются без разрушения, поэтому предел

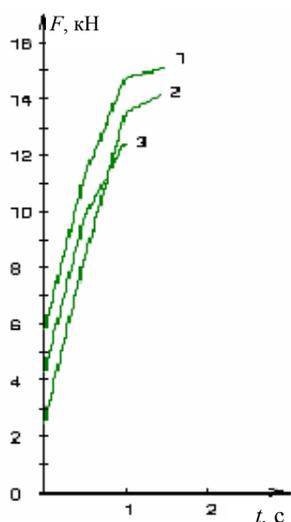


Рис. 2. Диаграммы испытаний на сжатие и результаты расчета механических характеристик образцов (табл. 1), полученных жидкофазным спеканием (ЖФС), динамическим (ДГП) и статическим горячим прессованием (СГП).

Т а б л и ц а 1. Механические характеристики образцов при испытаниях на сжатие

Кривая	$F_{\text{пц}}$, кН	$\sigma_{\text{с пц}}$, МПа	Примечание
1	14,75	922,13	ДГП
2	13,44	840,16	СГП
3	9,84	614,75	ЖФС

прочности при сжатии не определяется. Участки диаграмм, соответствующие упрочнению материала, на рисунке не показаны.

Затем на двух взаимно перпендикулярных гранях образцов сделали шлифы и сфотографировали их. Микроструктура материала, полученного методом ЖФС (рис. 3, а), характеризуется дисперсностью частиц хрома и высокой пористостью. Обработка изображения микроструктуры показала, что поры занимают до 10% площади фотографии. Гистограмма распределения частиц хрома по линейным размерам (рис. 4, а) имеет максимум в районе 15 мкм, характер распределения близок к логарифмическому нормальному, а ширина гистограммы свидетельствует о неравномерности распределения размеров частиц. Очевидно, только дисперсность зерен хрома обусловила относительно удовлетворительные механические характеристики этого материала. Однако неравномерное распределение частиц хрома и высокая пористость снижают диэлектрическую прочность межконтактного промежутка и электропроводность контакта. Следовательно, в исходном состоянии, то есть без дополнительной термомеханической обработки, этот материал мало пригоден для электрических дугогасительных контактов вакуумных выключателей из-за высокой пористости.

Микроструктура материала, полученного статическим горячим прессованием при температуре 1100 °С и давлении 8,9 МПа, прикладываемом в течение 30 мин, представлена на рис. 3, б, а гистограмма

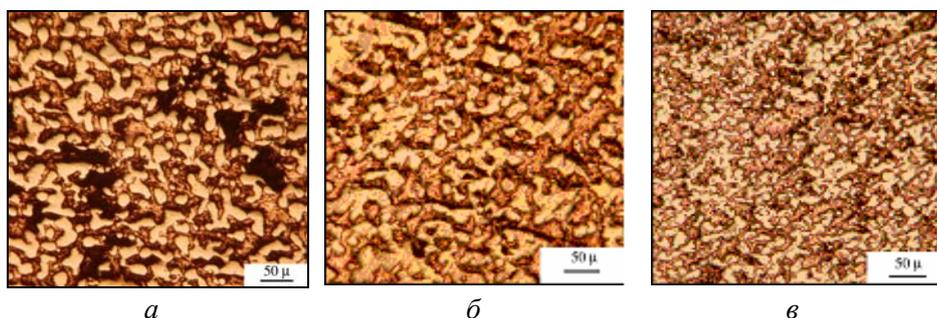


Рис. 3. Микроструктура композита Cr—Cu после жидкофазного спекания (а), статического (б) и динамического (в) горячего прессования.

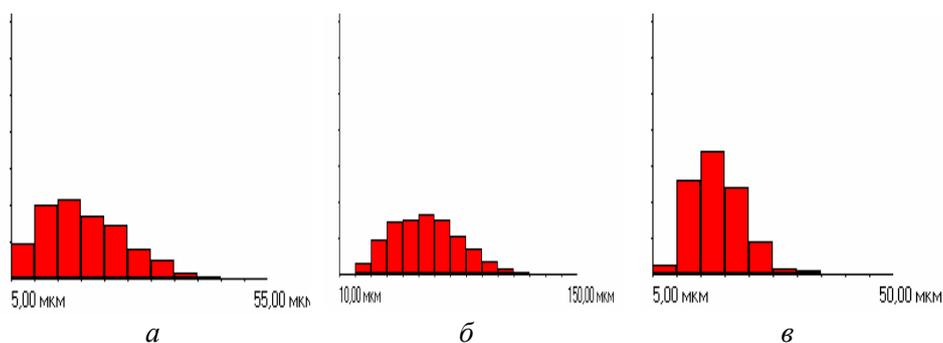


Рис. 4. Гистограммы распределения частиц хрома по линейным размерам в микроструктуре композита Cr—Cu после жидкофазного спекания (а), статического (б) и динамического (в) горячего прессования.

распределения линейных размеров частиц — на рис. 4, б. Пористость материала снизилась: обработка изображения микроструктуры показала, что поры занимают не более 2% площади фотографии. Как и ожидалось, статическая горячая допрессовка привела к росту линейных размеров частиц: гистограмма имеет максимум в районе 55 мкм, однако распределение стало близким к нормальному. Указанные обстоятельства отчасти объясняют более высокие механические характеристики этого материала.

На рис. 3, в приведена фотография микроструктуры материала, полученного динамическим горячим прессованием при 850 °С с последующим отжигом при 600 °С в течение 30 мин. Как видно на фото, для двухфазной системы не наблюдается характерной для ДГП ориентации частиц. Гистограмма распределения линейных размеров частиц (рис. 4, в), имеющая максимум в районе 15 мкм, свидетельствует о том, что размеры частиц не только не увеличились по сравнению с материалом, полученным жидкофазным спеканием, но и разброс размеров уменьшился, а характер распределения приблизился к нормальному. Обработка изображения микроструктуры показала дальнейшее уменьшение доли площади фотографии, занимаемой порами (менее 2%). По-видимому, малые размеры и равномерное распределение частиц хрома в сочетании с малой пористостью обусловили наиболее высокие механические характеристики материала из трех исследованных.

Наличие в программе “АМИС” модуля исследования пластической деформации микроструктурным методом позволило частично ответить на вопрос об изменении поведения материала, обусловленного его структурой. Для этого сфотографировали шлифы на образцах, подвергнутых сжатию до появления пластической деформации (образец укоротился на 15%), и обработали изображения одних и тех же участков микроструктуры до и после деформации по методу, предложенному Г. А. Смирновым—Аляевым [5]. Данный метод заключается в измерении длин отрезков, соединяющих диаметрально противоположные характерные точки на шлифе, и углов, составляемых этими отрезками с осями координат. Затем значения длин и соответствующих углов подставляют в расчетные соотношения, выведенные в предположении неизменности объема деформируемого тела, с целью получения характеристик главных компонент, интенсивности и вида деформации. Дальнейшие модификации метода, упрощающие расчет, подразумевают деформируемый материал не только

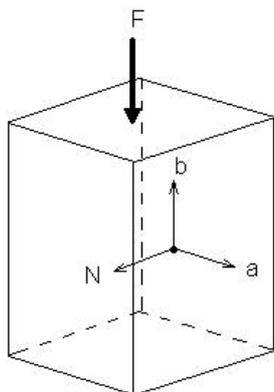
сплошным, но и имеющим равноосную однородную структуру. Двухфазные системы, в частности Ст—Си порошковые композиты, в общем случае не удовлетворяют этим условиям. Именно поэтому, во-первых, был применен микроструктурный метод Г. А. Смирнова—Аляева [5] и, во-вторых, для оценки отклонения расчетных значений были сделаны два шлифа на взаимно перпендикулярных гранях, направленных вдоль оси приложения сжимающего усилия. В этом случае нормальная компонента деформации для одной грани совпадает с компонентой, направленной вдоль главной оси второй грани, и наоборот. При сравнении образцов до и после испытаний замечено, что на зеркальной поверхности шлифа после деформации появляется рябь, обусловленная, очевидно, поворотом частиц хрома в медной матрице. Сопоставление фотографий одних и тех же участков микрошлифа до и после деформации свидетельствует о существенном изменении формы частиц, по-видимому, вследствие этого поворота при относительном постоянстве их взаимного расположения. При поиске взаимного соответствия частиц, вовлеченных в расчет, следует учитывать также возможность разделения конгломератов на отдельные частицы. Отсюда вытекает необходимость, во-первых, наносить на шлиф маркеры, позволяющие после деформации отыскать необходимый участок, и, во-вторых, выбирать характерные точки для измерения расстояний между частицами, относительно нечувствительные к искажению их формы, например геометрические центры.

При выборе для расчета характерных точек, расположенных на периферии фотографии шлифов образца материала, полученного горячей допрессовкой, получены значения характеристик деформации (табл. 2).

Характеристика вида деформированного состояния обеих граней свидетельствует о деформации сжатия. С учетом того, что главные компоненты деформации представляют собой натуральные логарифмы относительных удлинений вдоль осей принятой системы координат, и принимая расчетное значение компоненты деформации вдоль оси a более достоверным, чем нормальной компоненты, получим оценки относительной погрешности расчета нормальных компонент (верхний индекс показывает номер грани):

$$\delta_{N^1} = \left| \exp(M\varepsilon_{a^2}) - \exp(M\varepsilon_{N^1}) \right| / \exp(M\varepsilon_{a^2}) = |1,127 - 1,162| / 1,127 = 0,031 = 3,1\%;$$

$$\delta_{N^2} = \left| \exp(M\varepsilon_{a^1}) - \exp(M\varepsilon_{N^2}) \right| / \exp(M\varepsilon_{a^1}) = |1,053 - 1,056| / 1,052 = 0,0028 = 0,28\%.$$



Погрешности расчета компоненты вдоль оси приложения сжимающего усилия, то есть вдоль оси b , можно определить, исходя из измеренного относительного укорочения образца:

$$\delta_{b^2} = \left| \exp(M\varepsilon_{b^1}) - 0,85 \right| / 0,85 = 0,037 = 3,7\%$$

$$\delta_{b^1} = \left| \exp(M\varepsilon_{b^2}) - 0,85 \right| / 0,85 = 0,007 = 0,7\%.$$

Рис. 5. Физическая модель, используемая при расчете пластической деформации тела микроструктурным методом.

Т а б л и ц а 2. Характеристики деформации образца, полученного методом статического горячего прессования

Грань	Главные компоненты деформации			Вид деформированного состояния v_{ϵ}	Интенсивность деформации ϵ_i
	$M\epsilon_a$	$M\epsilon_b$	$M\epsilon_N$		
1	0,052	-0,20	0,15	0,46	0,20
2	0,12	-0,17	0,055	0,58	0,18

Микроструктурный метод расчета пластических деформаций позиционируется как инженерный, поэтому полученные значения погрешностей можно считать вполне приемлемыми. Однако известно, что пористое тело деформируется с изменением объема. Близость полученных экспериментальных результатов к рассчитанным по методике, исходящей из концепции сплошного тела, можно объяснить, по-видимому, относительно равномерным распределением частиц твердой фазы и низкой пористостью материала. Для подтверждения или опровержения этого предположения необходимы дополнительные исследования.

Выводы

Использование аппаратно-программного комплекса повышает оперативность исследования и обеспечивает получение полного массива данных о деформации. Ввод данных от датчиков физических величин и преобразователей непосредственно в компьютер снижает вероятность ошибок оператора и искажения данных при передаче от одного измерительного или расчетного модуля к другому. Наличие средств для механических испытаний и обработки изображений микроструктуры дает принципиальную возможность для установления зависимости между физическими и структурными свойствами материала. Получение результатов испытаний в форме отчета упрощает их восприятие, интерпретацию и дальнейшую обработку. Открытая архитектура комплекса дает возможность наращивания его функциональности в зависимости от возникающих задач.

1. Ван Флек Л. Х. Микроструктура // Физическое металловедение / Под ред. Р. Кана. — М.: Мир, 1968. — 491 с.
2. Баглюк Г. А., Хоменко О. І., Гончарук Д. А. Апаратно-програмний комплекс для дослідження структурних змін деформованого матеріалу // Наукові нотатки: Міжвуз. зб. — Луцьк: ЛНТУ. — 2009. — Вип. 25, ч. II. — С. 9—11.
3. Хоменко А. І., Хоменко Е. В. Програма автоматизації микроструктурного аналізу матеріалів // Порошкова металургія. — 2007. — № 1/2. — С. 122—127.
4. Slade P. G. Advances in material development for high power, vacuum interrupter contacts // IEEE Trans., Compon., Packag., and Manufact. Technology. Part A. — 1994. — 17, No. 1. — P. 96—106.

5. Смирнов-Аляев Г. А., Розенберг В. М. Теория пластических деформаций металлов. — М.—Л.: Машгиз, 1956. — 367 с.

Застосування комплексу “Тензор” для дослідження Cu—Cr матеріалів для контактів вакуумних вимикачів

О. І. Хоменко, О. В. Хоменко

За допомогою апаратно-програмного комплексу “Тензор” виконано дослідження порошкових композитних матеріалів складу 50% (мас.) Cr—50% (мас.) Cu, одержаних спіканням у присутності рідкої фази, статичним та динамічним гарячим пресуванням. Зроблено спробу пояснити механічні властивості матеріалів особливостями характеристик мікроструктур. Встановлено відхилення певних закономірностей поведінки матеріалів від прогнозованих на основі концепції суцільного тіла.

Ключові слова: апаратно-програмний комплекс, порошковий Cr—Cu композит, спікання в присутності рідкої фази, статичне та динамічне гаряче пресування, мікроструктура.

Application of a comolex “Tensor” for the study of Cu—Cr powder materials for the vacuum switches contacts

A. I. Khomenko, E. V. Khomenko

The study of powder Cr—Cu composite (50% (mass.) Cr—50% (mass.) of Cu), produced by sintering in the presence of liquid phase, static hot pressing and dynamic hot pressing with the aid of the “Tensor” computer-based complex is executed. The usage of “Tensor” computer-based complex increases effectiveness and completeness of information about the material. The direct introduction of physical quantities given from the sensors and converters into the computer decreases the probability of the errors of operator and distortion of data during transfer from one measuring or calculating module to another. The attempt to explain mechanical properties of materials basing on the special features of microstructure is made. The deviation of some laws governing the behavior of materials from those forecasted basing on the solid body conception is established.

Keywords: computer-based complex, powder Cr—Cu composite, sintering in the presence of liquid phase, static hot pressing, dynamic hot pressing, microstructure.