

Литература:

1. Dovydenkov, V.A. Model and Method to Calculate Viscosity of Metal and polymer Composites (MIM - Feedstocks)/V.A. Dovydenkov//Prog. Of the PM2008 International Powder Metallurgy Congress. Mannheim. 29th September – 1st October 2008. – Vol.2 – P.263-268.
2. Довыденков, В.А. Модель для расчета вязкости композиций порошок – связующее для получения заготовок путем их литья и спекания / В.А. Довыденков, Г.П. Фетисов //Заготовительные производства в машиностроении. – 2009.- №1. – С. 47-49.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСАДОЧНЫХ И КАПИЛЛЯРНЫХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВО-ВОЛОКНОВЫХ ПОРИСТЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР

ДОКТОРОВ В. В., ИЛЬЮЩЕНКО А.Ф., МАЗЮК В. В.

Институт порошковой металлургии, г. Минск, Беларусь

Введение. Существенным недостатком порошковых капиллярных структур является относительно большая усадка при спекании, которая приводит к возникновению усадочных пор на границе капиллярной структуры и корпуса тепловой трубы. Усадочные поры создают дополнительное тепловое сопротивление между корпусом и структурой и тем самым резко ухудшают параметры тепловой трубы. Этот эффект практически не заметен для тепловых труб диаметром 14-16 мм, но оказываются существенным при изготовлении тепловых труб диаметром 6-8 мм и особенно сильно проявляется при изготовлении миниатюрных тепловых труб. Причины усадки в порошковых капиллярных структурах объясняются в работе [1]. При этом важно, что силы, вызывающие усадку, возникают на границе соприкасающихся частиц порошка и приводят к сближению центров этих частиц.

Моделирование порошково-волоконных капиллярных структур. Усадке препятствуют силы межчастичного трения. Если капиллярная структура при усадке представлена как сплошная среда, то силы межчастичного трения можно соотнести с эффективным модулем упругости капиллярной структуры, который характеризует явления, препятствующие усадке. Таким образом, капиллярную структуру, подвергающуюся усадке при спекании, можно представить как сплошную среду, подвергающуюся сжатию под действием сил, равномерно распределенных по объему. Одним из наиболее

эффективных способов увеличения модуля упругости среды является ее армирование волокнами, модуль упругости которых существенно больше, чем у самой среды [2]. В связи с этим, предлагается использовать волокна в качестве армирующих элементов, препятствующих сокращению размеров матрицы - порошковой капиллярной структуры (рис. 1).

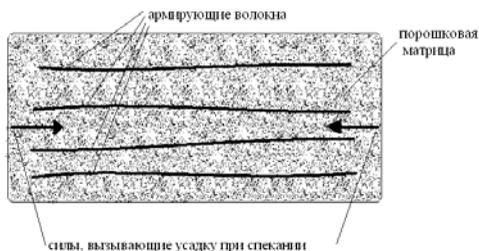


Рис. 1. Модель композиционной пористой структуры при спекании

При производстве тепловых труб применяются два типа капиллярных структур: кольцевая и сплошная. Оптимальная ориентация волокон для каждого из них представлена на рисунке 2.

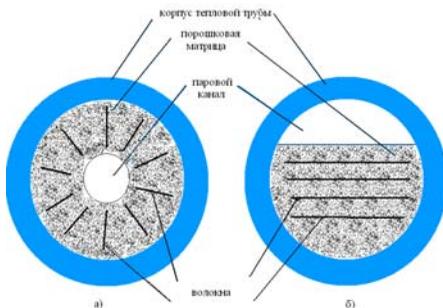


Рис. 2. Оптимальная ориентация волокон для кольцевых (а) и сплошных (б) капиллярных структур тепловых труб

Таким образом, в качестве модели, описывающей поведение капиллярной структуры при спекании, выбрана модель сжатия композиционного материала, армированного волокнами в направлении действия сил сжатия. Для расчета параметров волоконного наполнителя композиционного материала, работающего на сжатие, используются соотношения [2]:

$$P_B / P_M = E_B V_B / [E_M (1 - V_B)], \quad (1)$$

и

$$E_{KM} = E_B V_B + E_M (1 - V_B), \quad (2)$$

где P_B - давление, воспринимаемое волокновым наполнителем;
 P_M - давление, воспринимаемое матрицей; E_B - модуль упругости материала волокна; E_M - модуль упругости материала матрицы; E_{KM} - модуль упругости композиционного материала; V - объемная доля волокон.

С учетом закона Гука приходим к выводу, что для проектирования порошково-волоконных капиллярно-пористых структур (конкретнее – для расчета и минимизации уменьшения линейных размеров материала под воздействием сил, вызывающих усадку при спекании) необходимо знать величину давления, приводящего к усадке порошка при спекании.

Определение давления усадки при спекании. В работе предложен следующий метод определения искомого давления. В цилиндрическую трубку засыпается порошок и спекается (рис. 3, а). Под действием сил, вызывающих усадку, порошковый материал отстает от стенок трубки; в результате площадь контакта порошкового материала со стенкой уменьшается, а давление со стороны материала на стенку возрастает (рис. 3 б). Этот процесс прекращается, когда давление усадки на пристеночный слой порошка сравняется с давлением, вызванным весом самого порошка (рис. 3, в). Изображение шлифа поперечного сечения образца, выполненного из порошка ПМС-Н фракции (+63...-100) мкм, приведено на рисунке 3 г). Определив давление вблизи зоны отрыва порошка от стенки, можно определить и давление, вызывающее усадку. Из геометрических соображений несложно показать, что если в области отрыва корпус образует угол α с горизонтом, то искомое давление можно определить по формуле:

$$P_v = P(\cos^2 \alpha + \theta^2 \sin^2 \alpha), \quad (3)$$

где P_v - давление усадки; P - давление порошковой навески на высоте отрыва; θ - коэффициент Пуассона.

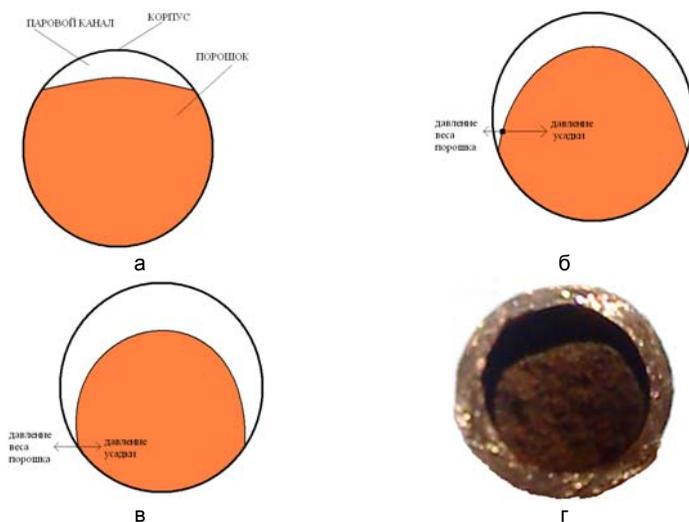


Рис. 3.К описанию метода определения давления усадки

Для определения давления усадки порошка фракции (+63...-100) мкм – она, как правило, применяется в ГНУ ИПМ для изготовления капиллярной структуры в зоне испарения – был исследован образец, изображенный на рисунке 3 г (внутренний диаметр корпуса равен 8 мм).

Внутренний диаметр корпуса образца равен 8 мм, длина образца – 50 мм, масса порошка – 6,8 г, оценочное значение коэффициента бокового давления, исходя из данных [1, 196], принималось равным 0,4.

В результате расчетов по формуле (3) с учетом геометрических параметров шлифа, изображенного на рисунке 3, г получено значение давления усадки, равное 200 Па. При $V_B = 0,05$ (минимальное значение V_B , при котором формула (2) может применяться) усадочное смещение частиц порошка, прилегающих к корпусу, составит величину порядка 10^{-9} м. Таким образом, максимальное объемное содержание волокон не превышает 5%. Однако, поскольку допустимый уровень усадочного смещения может составлять величину 10^{-5} м (порядка размера пор), вероятно, что объемное содержание волокон будет составлять величину порядка процента.

Смешивание порошково-волоконных структур. Для исследования возможности обеспечения равномерного

распределения волокон по объему смеси была проведена серия экспериментов по смешиванию медных порошков различных фракций и медных волокон различного размера. В результате исследовалась равномерность распределения волоконной составляющей в объеме порошковой навески.

Степень равномерности определялась следующим образом. После завершения процесса смешивания из разных участков навески изымались для анализа ее фрагменты. Методом ситового анализа осуществлялось разделение порошковой и волоконной составляющей, а затем определялось массовое соотношение волоконного компонента во фрагменте p_{ϕ} .

Среднее по навеске соотношение волоконного компонента p_{CP} является величиной известной (определяется еще до смешивания), и, фактически, может рассматриваться как математическое ожидание содержания волокна во фрагменте. Тогда аналогом среднеквадратичного отклонения для значений p_{ϕ} является величина:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (p_{\phi_i} - p_{CP})^2}, \quad (4)$$

где s - среднеквадратичное отклонение содержания волоконной компоненты во фрагментах навески, n - количество исследованных фрагментов в навеске.

Таким образом, следует определить способы смешивания порошковой и волоконной составляющей, при которых s принимало бы возможно меньшие значения.

В экспериментах использовались медный порошок фракций (+63...-100) мкм, (+100...-200) мкм, (+200...-315) мкм и (+315...-500) мкм. Также использовались медные волокна диаметром 100 мкм и длиной 1, 2, и 3 мм. Значение p_{CP} для всех навесок составляло 1%.

Смешивание компонентов осуществлялось на вибрационном стенде ВЭДС - 10А, который позволяет варьировать как частоту, так и ускорение вибрации.

По результатам исследования был сделан вывод, что в диапазоне ускорений вибрации от 2 до 20 м/с² существенный влияний значения ускорения на равномерность перемешивания

не выявлено. Также не было выявлено влияния значения частоты вибрации на равномерность перемешивания в диапазоне частот 30-300 Гц. Высокие значения параметра s указывают на существенную вибрационную сепарацию компонентов смеси. Между тем, в некоторых случаях смесь является значительно более однородной. Проведенный анализ показал, что значительное уменьшение параметра s наступает в случаях, когда средние объемы частицы порошка и частицы волокна сравниваются (для случая, когда и порошок, и волокно изготовлены из одного материала).

Для выяснения влияния плотности компонентов по аналогичной методике были проведены исследования по смешиванию медных волокон и кварцевого песка. По результатам был сделан более общий вывод: однородность навески существенно повышается при сближении средних значений массы частицы порошка и частицы волокна. Следовательно, при изготовлении волокнуво-порошковых капиллярно-пористых структур следует использовать волокна такой длины, чтобы разность масс частиц порошка и волокна была наименьшей.

Моделирование усадки при спекании порошково-волоконных капиллярно-пористых структур. Прежде всего, необходимо было оценить параметры порошковой капиллярной структуры, которыми она обладает в процессе спекания. Поскольку значение давления поверхностных сил, возникающих при спекании, уже было оценено в предыдущих этапах величиной порядка 200 Па, в данной работе необходимо было оценить только значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Варьируя значения указанных параметров, определялись такие значения горизонтальной, общей и вертикальной деформаций (Рис. 4 а, б и в соответственно), чтобы полученные значения соответствовали экспериментальным данным (Рис. 4, г).

На основании исследований было установлено, что значение модуля Юнга может быть оценено как 500 Па, а коэффициент Пуассона – 0,3 (важно подчеркнуть, что такие оценки сделаны для порошка именно в момент спекания, и они не могут быть в рамках данного исследования обобщены на случай свободнотасыпанного порошка при низких температурах).

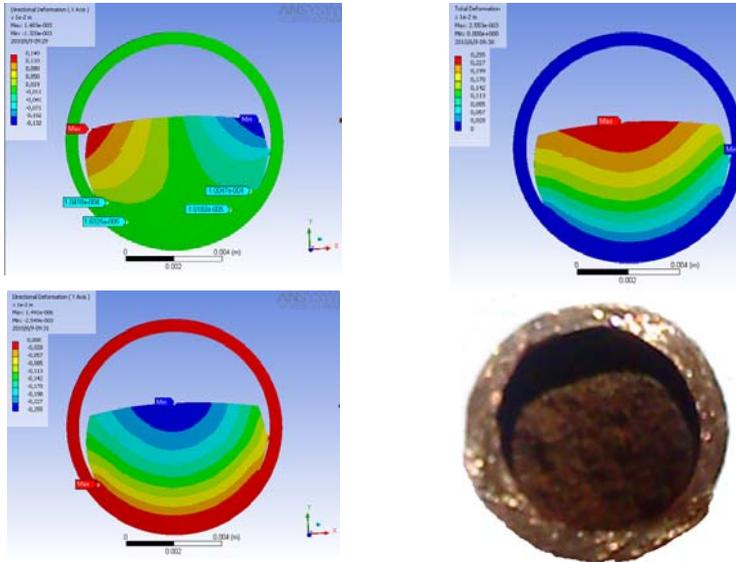
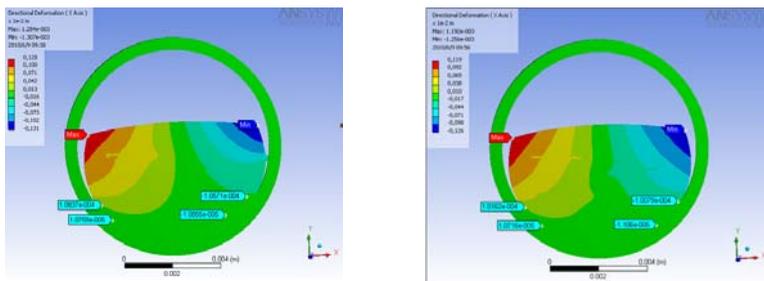


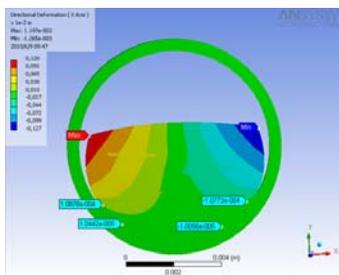
Рис. 4. Усадочные деформации в порошковой структуре

Далее в модель порошковой среды были последовательно добавлены четыре элемента, моделирующих волокно. Массовая доля каждой единицы волокна соответствует 0,25% от массы порошковой структуры. Волокна предполагаются подвижными в направлении X и Y. Зависимость горизонтальных усадочных деформаций представлена на рисунке 5.

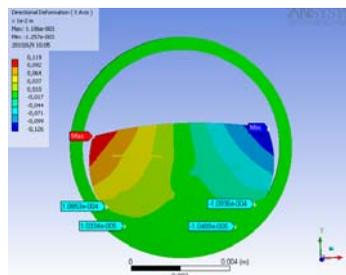


Количество частиц волокна - 1

Количество частиц волокна - 2



Количество частиц волокна - 3



Количество частиц волокна - 4

Рис. 5. Усадочные горизонтальные деформации в порошково-волокнутой структуре

На основании представленных данных был сделан вывод, что добавление волокон в порошковую среду действительно уменьшает усадку (в данном случае: на 5-15 %).

Далее была промоделирована усадка при спекании для порошково-волокнутой смеси, в которой волокна неподвижны в горизонтальном направлении (допустим, волокна образуют сетку, не опирающуюся на цилиндрический корпус). Результаты моделирования показали, что условие неподвижности волокон в горизонтальном направлении не существенно влияет на процесс усадки при спекании.

Далее была промоделирована усадка при спекании для порошково-волокнутой смеси, в которой волокна неподвижны в вертикальном направлении (допустим, волокна образуют сетку, опирающуюся на цилиндрический корпус). Результаты моделирования приведены на рисунке 6. Результаты моделирования показали, что условие вертикальной неподвижности волокон приводит существенному снижению полезной роли силы тяжести, которая прижимает смесь к нижней поверхности цилиндрического корпуса и способствует образованию надежного контакта между пористой структурой и корпусом. Так, на рисунке 6 (а) показано направление деформаций, при условии что все волокна подвижны относительно вертикали. На рисунке 6 (б) неподвижны по вертикали левые волокна, что приводит к резкому увеличению горизонтальной деформации слева. На рисунке 6 (в) вертикально неподвижны все волокна, кроме нижнего правого. При этом проявляется не только существенная горизонтальная усадка справа, но и вертикальная усадка снизу вверх. То же видно на рисунке 6 (г), когда все волокна горизонтально неподвижны. Таким образом,

условие вертикальной неподвижности волокон приводит к резкому ухудшению контакта между композиционной порошково-волокнутой капиллярно-пористой структурой и поверхностью корпуса.

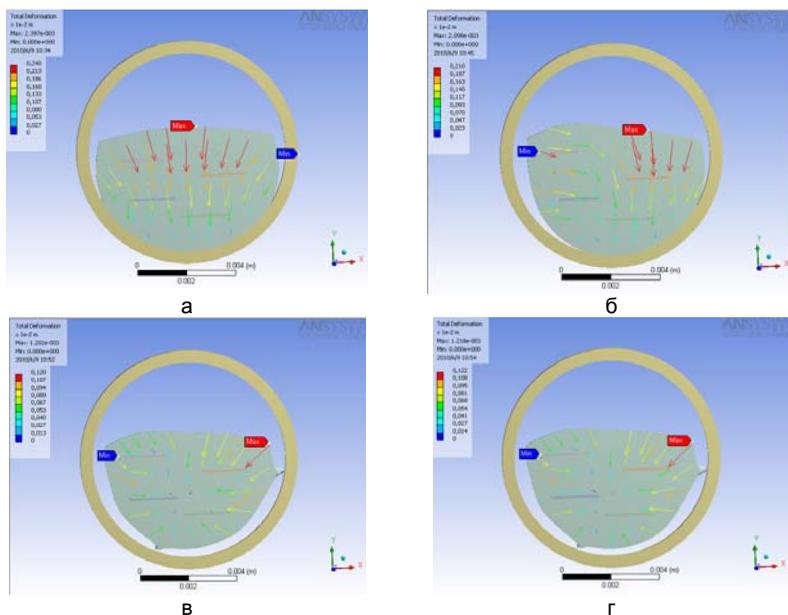


Рис. 6 Усадочные деформации в порошково-волокнутой структуре при горизонтально неподвижных волокнах

Выводы. Для снижения усадки при спекании предлагается использовать волокна в качестве армирующих элементов, препятствующих сокращению размеров матрицы - порошковой капиллярной структуры. Давление, вызывающее усадку при спекании описанных в статье порошков оценено величиной 200 Па, а необходимое объемное содержание волокон в смеси – величиной порядка одного процента. Показано, при изготовлении волокнуто-порошковых капиллярно-пористых структур следует использовать волокна такой длины, чтобы разность масс частиц порошка и волокна была наименьшей. На основе моделирования показано, что наличие волокнутой компоненты снижает усадку при спекании при условии, если положение волокон не зафиксировано относительно вертикальной оси.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований

Литература:

1. Порошковая металлургия. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. М., «Металлургия», 1980. 496 с.
2. Материаловедение: Учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под общ. Ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 8-е изд., стереотип. – Изд-во МГТУ им. Баумана, 2008. – 648 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НЕОДНОРОДНЫХ Порошковых Капиллярных Структур Тепловых Труб

ДОКТОРОВ В. В., МАЗЮК В. В., РАК А.Л.

Институт порошковой металлургии, г. Минск, Беларусь

Введение. Ключевым элементом порошковых тепловых труб является порошковая капиллярная структура (ПКС). Во многих известных прежде применениях использовались однородные ПКС, которые изготавливались из порошков одной фракции. Между тем в ряде случаев (в миниатюрных и антигравитационных тепловых трубах) применение однородных ПКС не позволяет достичь требуемых характеристик. При этом использование неоднородных ПКС является, с одной стороны, перспективным способом улучшения теплопередающих характеристик ПКС, а с другой стороны, является еще мало изученной областью порошкового материаловедения. В основу создания неоднородных ПКС заложен принцип увеличения среднего размера пор от зоны испарения к зоне конденсации [1]. В данной работе проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния параметров неоднородных ПКС на теплопередающую способность тепловых труб.

Свойства порошковых капиллярных структур. Прежде всего, были исследованы свойства ПКС, которые применялись при изготовлении исследуемых тепловых труб.

Пористость образцов ПКС определялась методом гидростатического взвешивания (ГОСТ 18898–89) [2].

Капиллярное давление, создаваемое ПКС, определялось методом измерения давления, необходимого для выделения на поверхности полностью насыщенного жидкостью образца первого пузырька воздуха (ГОСТ 26849–86) [3]. Средний гидравлический диаметр пор ПКС находился методом измерения давления, соот-