

моторостроительном и вертолетном объединениях организованы промышленные участки окрасочного производства для реализации технологических процессов нанесения и формирования защитных порошковых покрытий.

Типаж оборудования позволяет проводить работы по дальнейшему совершенствованию технологических процессов нанесения защитных покрытий на основе ППК.

## **ДЕФОРМИРОВАНИЕ СЕТЧАТО-ЯЧЕИСТЫХ МЕТАЛЛОВ КАК СПОСОБ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ИХ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ**

**Данченко Ю.В. , Кулаков С.В.**

*614013 Пермь, Политехнический проезд, 6, РИТЦ ПМ.*

*Тел.: 3422-391110. FAX: 3422-39112*

*E-mail: Dan@retcpm.pstu.ac.ru*

**АННОТАЦИЯ.** Исследованы закономерности поведения модуля упругости материалов с сетчато-ячеистой структурой в цикле разгрузка – повторное сжатие в зависимости от предшествовавшей упруго-пластической деформации, пористости и диаметра ячейки каркаса и качества обработки поверхности.

Структурные особенности высокопористых проницаемых ячеистых материалов (ВПЯМ) – микропористость матрицы, меньшая степень замкнутости поверхностных тяжей с каркасом, кривизна тяжей, статистическое распределение их направленности в пространстве, а также механизм деформации сетчато-ячеистого каркаса ставят под сомнение выполнение для них положения о неизменности модуля упругости в цикле разгрузка – повторное нагружение, справедливого для совершенно упругих однородных металлов согласно теореме о разгрузке.

Модуль упругости при сжатии  $E^c$  определяли по диаграммам деформирования разгрузкой и повторным нагружением при различных степенях осевой деформации. Было отмечено увеличение  $E^c$  при повторном нагружении, причем степень возрастания  $E^c$  определялась величиной предварительной упруго-пластической деформации, химическим составом (Cu, 36Н), пористостью ( $P$ ) и диаметром ячейки ( $d_0$ ) ВПЯМ и качеством обработки нагружаемых поверхностей.

Коэффициент увеличения модуля упругости, равный отношению модуля упругости на последующих ступенях нагружения  $E_1^c$  к первоначально определенному  $E_0^c$ , уменьшался с улучшением качества подготовки оснований сетчато-ячеистых образцов. Так, при испытании образцов ВПЯМ-Cu с необработанными основаниями отношение  $E_1^c/E_0^c$  изменялось в диапазоне 12 - 27 (в зависимости от структурных параметров ВПЯМ-Cu), и этот коэффициент принимал значения от 3 до 12, если основания образцов предварительно обрабатывались до достижения непараллельности 0,005 - 0,009 мм. При нагружении образца ВПЯМ с необработанными основаниями нагрузку воспринимали не все, а отдельные поверхностные тяжи, через которые происходила передача усилия вглубь образца и развивались различного рода деформационные явления. Вследствие этого начальные напряжения в упругой области на диаграмме сжатия получались заниженными, а деформации завышенными до тех пор, пока не происходило выравнивание поверхности образца и в противодействие внешней нагрузке не стали участвовать все поверхностные тяжи. С этого момента упруго-пластическое поведение необработанных образцов ВПЯМ становилось таким же, как для обработанных.

Для обработанных образцов модуль упругости зависел от степени осевой деформации и возрастал даже тогда, когда разгрузку и повторное нагружение проводили на участке упругой деформации. При этом напряжения в матрице изменялись от нуля до критических значений, приводящих к деформациям, которые являлись упругими, комбинируемыми с деформациями от закрытия микропор в наибо-

лее ослабленных тяжах. Микронеоднородности в матрице ВПЯМ и концентрация напряжений на их границах приводили к появлению локальных напряжений, достаточно высоких для возникновения локальной пластической деформации, когда макроскопическое напряжение было еще мало. Поэтому первоначально определенные деформации получались выше истинно упругих деформаций тяжей, а вычисленные по ним модули упругости оказывались меньше модулей, найденных при последующих ступенях нагружения.

После выбора микродефектов и перестройки структуры в плане включения в противодействие внешней нагрузке большинства тяжей деформация образца происходила в большей степени за счет изгиба тяжей, хотя процесс "залечивания" микродефектов при сжатии тяжей продолжал иметь место. Вследствие этого разница между модулями упругости становилась менее заметной. Циклическое нагружение в области пластических деформаций от 0,1-0,3 до 1,5-2 % приводило к получению практически стабильных значений  $E_1^c$ , разница между которыми составляла 3-9 % и была близка к допустимой погрешности эксперимента.

Дальнейшее поведение модуля упругости при величине остаточной деформации свыше 1,5-2 % зависело от структурных параметров ВПЯМ и его матрицы. Так, для ВПЯМ-Si падение  $E_1^c$  наблюдалось лишь при  $P > 95$  % и  $d_n > 2,2$  мм, тогда как для менее пластичного ВПЯМ-36Н уменьшение значений  $E_1^c$  происходило при  $P > 93,5 - 94,5$  %,  $d_n > 1,8$  мм. Снижение значений  $E_1^c$  было связано с процессами разупрочнения тяжей вследствие накопления повреждений и потери ими устойчивости. Сжатие ВПЯМ-Si, 36Н с меньшими значениями  $P$  и  $d_n$  при указанных степенях деформации не сопровождалось уменьшением  $E_1^c$ .

Коэффициент возрастания  $E_1^c$  до достижения им стабильных значений имел тенденцию к некоторому увеличению с ростом  $P$  и  $d_n$ . Это объяснялось повышением пластичности и податливости тяжей и соответственно уменьшением их способности к быстрой передаче напряжений. Подтверждением определяющей роли пластичности тяжей на отношение

$E_1^c/E_0^c$  является то, что на более пластичном ВПЯМ-Си достигались большие его значения, чем на ВПЯМ-36Н.

Исследование влияния масштабного фактора на отношение  $E_1^c/E_0^c$  (под масштабным фактором понималось отношение высоты образца к его диаметру) обнаружило факт монотонного возрастания  $E_1^c/E_0^c$  с увеличением высоты образцов ВПЯМ, так как при этом возрастало число степеней свободы тяжей и увеличивалась вероятность их переориентации по отношению к направлению приложения внешней нагрузки.

Проведенные опыты показали, что тангенс угла наклона начального линейного участка диаграммы деформации ВПЯМ нельзя принимать за его модуль упругости. Это подтверждается тем, что модуль упругости, измеренный динамическим резонансным методом, существенно выше значения  $E_0^c$  и близок к значениям  $E_1^c$ , полученным после нагружения при незначительной пластической деформации. Таким образом, для реализации в конструкционных элементах из ВПЯМ более высокого уровня упругих свойств необходимо подвергать их "эксплуатационному наклепу" в соответствующем направлении.

Исследование влияния термообработки на модуль упругости проводили на образцах ВПЯМ-Си, предварительно подвергнутых упруго-пластической деформации до достижения постоянного значения  $E_1^c$ . После отжига в среде водорода образцы нагружали и разгружали, определяя на диаграммах сжатия значения  $E_1^c$  на первом цикле нагружения и сравнивая их с соответствующими значениями  $E_0^c$  для недеформированного ВПЯМ-Си. Величина отношения  $E_1^c/E_0^c$  уменьшалась пропорционально температуре отжига, однако эффект "ориентированного наклепа" сохранялся. После отжига образцов ВПЯМ-Си, предварительно подвергнутых осадке до величины деформации 0,1-1,5 %, наблюдали уменьшение их продольных размеров на 0,3-1,2 % (соответствующие температурные границы - 770-1110 °С). Это свидетельствовало о протекании рекристаллизационных процессов в матрице, а не о каких-либо изменениях в макроструктуре

ВПЯМ. Полученные результаты подтвердили целесообразность проведения ориентированного наклепа на элементах из ВПЯМ даже перед последующей термообработкой.

С целью обеспечения элементам из ВПЯМ более ориентированной структуры, стабильных упругих свойств и повышенного сопротивления упруго-пластической деформации разработан способ спекания заготовок ВПЯМ под давлением груза. В зависимости от величины усадки ВПЯМ при спекании использовали две модификации специализированной оснастки. На заготовку ВПЯМ с величиной усадки 2-5 % груз устанавливали до спекания. Вес груза выбирали исходя из условия превышения давления на заготовку предела текучести ВПЯМ при температуре спекания.

При спекании ВПЯМ с более значительной усадкой нагружение заготовки производили после завершения в ней объемных изменений. Спеченные таким образом образцы ВПЯМ характеризовались плоскостностью оснований, заранее заданной толщиной и повышенным уровнем жесткости.

## **К ВОПРОСУ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭКСТРУЗИЕЙ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ ЗАГОТОВОК**

**Дроздов И.А.**

*Самарский государственный аэрокосмический университет  
443086 Самара, Московское шоссе, 34  
E-mail: gl@lib1.ssau.ru*

**АННОТАЦИЯ** При коэффициенте вытяжки не менее 2 достигается не только требуемое формоизменение, но и уплотнение заготовок до беспористого состояния. При этом степень деформации заготовок выше, чем металла и зависит от их исходной пористости.