

УДК 539.3

*БАРАШКОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук,
ст. научный сотрудник, профессор,
v.n.bar@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2,*

*ГЕРАСИМОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ, докт. физ.-мат. наук,
профессор, заведующий отделом,
ger@niipmm.tsu.ru*

*Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Вид связи между напряжениями и деформациями в порошковых материалах определяется путём экспериментальных исследований образцов из эталонных материалов с известными физико-механическими характеристиками и геометрически идентичных образцов из порошковых материалов. Количественные оценки получают, с одной стороны, экстра- или интерполяцией полученных экспериментальных данных, а с другой – подбором и уточнением по результатам экспериментов соответствующих характеристик, закладываемых в расчёт. Показана применимость соотношений теории малых упруго-пластических деформаций для исследования напряжённо-деформированного состояния элементов конструкций из порошковых материалов при квазистатическом нагружении.

Ключевые слова: физико-механические характеристики конструкционных материалов; порошковые материалы; гипотеза единой кривой; экспериментальные методы исследования характеристик; образцы-свидетели; образцы-аналоги; численное моделирование напряжённо-деформированного состояния; вариационно-разностный метод; перемещения; деформации; напряжения; квазистатическое нагружение.

*VLADIMIR N. BARASHKOV, DSc, Professor,
v.n.bar@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia,*

*ALEKSANDR V. GERASIMOV, DSc, Professor,
ger@niipmm.tsu.ru*

*National Research Tomsk State University,
36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia*

CALCULATION-EXPERIMENTAL TECHNIQUE FOR DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF POWDER MATERIALS

The paper deals with the stress and strain relationship in powder materials determined by the experimental studies of reference material samples having the known physical and me-

chanical properties and geometry. The quantitative analysis is carried out via extra- or interpolation of experimental data on the one hand, and selection and refinement of experimental results on the other. The theory of small elasto-plastic deformations can be used to investigate the stress-strain state of structural elements made of powder materials and subjected to quasi-static loading.

Keywords: physical and mechanical properties; powder materials; single curve hypothesis; experimental techniques; witness-samples; analog-samples; numerical simulation of stress-strain state; variation-difference method; displacement; deformation; stress; quasi-static loading.

Для изготовления элементов конструкций наряду с традиционными конструкционными материалами достаточно широко используются новые, в том числе порошковые, материалы (ПМ). Для теоретического анализа напряжённо-деформированного состояния (НДС) изделий, выполненных из порошковых материалов, необходима информация о физико-механических характеристиках (ФМХ) последних. Эта информация является основой для построения определяющих соотношений в уравнениях механики деформируемого твердого тела (МДТТ), в частном виде которых связываются соответственно величины компонент тензоров напряжений и деформаций $\sigma_{ij} \sim \varepsilon_{ij}$. Согласно гипотезе единой кривой МДТТ вид связи интенсивности напряжений и деформаций $\sigma_i \sim \varepsilon_i$ для конкретного материала не зависит от характера напряжённого состояния, а определяется механическими свойствами этого материала. Именно это обстоятельство позволяет рассматривать результаты испытаний материалов на стандартных образцах как характеристики этих же материалов для любых изготовленных из них конструкций. Естественно ожидать, что погрешность, возникающая при использовании этого допущения, будет тем меньше, чем слабее отличие характера НДС материала в конструкции от НДС в исследуемом образце. При исследовании ФМХ «...важно обеспечить условия, в наиболее полной мере отвечающие реальным условиям работы проектируемого элемента конструкции» [1].

Для традиционных конструкционных материалов существуют надежные экспериментальные методики определения их ФМХ, а большинство материалов паспортизировано. Для этих материалов накоплен значительный опыт, позволяющий утверждать, что гипотеза единой кривой в широких пределах изменения параметров НДС оправдывает себя. Для новых же конструкционных материалов, полученных, в частности, прессованием из порошков, существование гипотезы единой кривой и её использование в каждом отдельном случае требует своего экспериментального обоснования, а определение их ФМХ представляет достаточно сложную проблему. Поэтому актуальной является задача создания методики, позволяющей на основе небольшого количества экспериментов получать значения ФМХ ПМ для дальнейшего использования их в расчётах на этапе конструкторско-технологической обработки опытных изделий.

Все механические свойства изделий в общем случае тесно связаны с механическими свойствами материалов, а также с особенностями самой конструкции и условиями нагружения. Испытания на растяжение – основной и наиболее изученный вид исследования и контроля механических свойств

материалов. Их используют для определения количественных значений модуля упругости, коэффициента Пуассона, предела текучести, деформации начала текучести, модуля упрочнения и других важных характеристик конструкционных материалов. Испытания на растяжение служат для исследования поведения материала при одноосном нагружении, когда растягивающая нагрузка равномерно распределена по всему поперечному сечению образца [2]. Популярность одноосного растяжения как метода испытания объясняется, главным образом, простотой определения и лёгкостью обработки и анализа результатов испытания.

Материалы в процессе эксплуатации подвергаются также сжатию. Испытания материалов при одноосном сжатии можно рассматривать как обратные испытания на растяжение. Отличием испытаний на сжатие является то, что многие материалы весьма значительно деформируются без разрушения на конечной стадии испытаний. Испытания проводятся при однократном или длительном сжатии до потери устойчивости (разрушения) или до достижения определенной степени деформации, обычно при той же скорости, что и на растяжение.

Использование новых композиционных материалов при изготовлении элементов конструкций требует либо разработки новых подходов к оценке ФМХ, либо обоснования применимости существующих методов. Простое перенесение разработанных подходов к определению ФМХ традиционных изотропных материалов на новые неприменимо (как неприменимо и автоматическое перенесение опыта обработки компактных (литых) металлов и сплавов на обработку пористых материалов) по нескольким причинам. Это и необходимость учёта анизотропии, и вопрос о представительности испытываемого образца, ибо возникает новая самостоятельная проблема соответствия характеристик материалов образца и испытываемой конструкции.

Принципиальное отличие ПМ от традиционных связано дополнительно с тем, что свойства ПМ формируются непосредственно в процессе изготовления детали и неразрывно связаны с технологией её производства. Это не позволяет гарантировать получение стандартного образца с теми же свойствами, что и у материала конструкции, даже при соблюдении технологического режима. Кроме того, не всегда форма и геометрические размеры исследуемой конструкции позволяют изготовить из неё стандартный образец. Так, образцы, используемые для испытаний ПМ на растяжение, согласно ГОСТ 18227–98, должны иметь длину 90 мм. Поэтому возникает проблема выбора формы и размеров образцов-свидетелей из исследуемого материала и способов их нагружения.

Взяв в качестве таких образцов некоторую типичную конструкцию, после экспериментального определения конкретных зависимостей между некоторыми компонентами тензоров σ_{ij} и ε_{ij} для получения ФМХ можно пойти различными путями. Один из них заключается в выполнении серии расчётов НДС испытываемого образца-свидетеля с некоторыми условными значениями ФМХ материала, уточняемыми (подбираемыми) затем с целью наилучшего согласования результатов экспериментов и расчётов. При таком подходе два недостатка очевидны. Во-первых, за полученными таким образом значениями искомых характеристик материала «спрятаны» погрешности, присущие самому расчёту. Во-вторых, значения ФМХ сами по себе будут зависеть от моде-

ли, заложенной в расчёт, т. к. для различных моделей МДТТ разнятся и наборы постоянных, характеризующих ФМХ материалов.

Второй путь заключается в испытании ряда образцов-аналогов, совпадающих по геометрическим характеристикам и способу нагружения с испытуемым образцом-свидетелем. При этом ФМХ аналогов должны быть известны и служить своего рода эталонами. Подбором их можно добиться качественного подобия зависимостей $\sigma_{ij} \sim \varepsilon_{ij}$, что позволит использовать известную модель МДТТ для нового материала. Количественные зависимости $\sigma_{ij} \sim \varepsilon_{ij}$ позволят тогда, отталкиваясь от эталонных ФМХ, определить соответствующие параметры для исследуемого ПМ с помощью экстра- или интерполяции.

В работе были использованы оба подхода и сопоставлены результаты, полученные при определении ФМХ разными способами, для варианта деформационной теории пластичности (теории малых упругопластических деформаций) А.А. Ильюшина. Следует отметить, что по традиционному пути испытания стандартных цилиндрических образцов на одноосное растяжение при исследовании ПМ пойти не удалось. Одна из причин заключается в специфических свойствах ПМ, не позволяющих изготавливать в достаточном количестве упомянутые образцы вытачиванием на токарном станке из готовых деталей. Если же формовать эти образцы непосредственно прессованием аналогично изготовлению самих деталей, то возникает, как отмечалось выше, самостоятельная проблема оценки соответствия характеристик материалов образцов и конструкций.

Исследовавшиеся элементы конструкции представляли собой трубчатые цилиндрические детали, работающие в условиях квазистатического осевого нагружения. Они получены из железного порошка марки ПЖЗМЗ методом холодной деформации пористой спеченной заготовки с последующим отжигом готового изделия. Эксперименты по определению ФМХ проводились на цилиндрических трубчатых деталях (внешний радиус $1,5 \cdot 10^{-2}$ м, внутренний $1,1 \cdot 10^{-2}$ м, длина $4,3 \cdot 10^{-2}$ м), подвергаемых осевому сжатию на универсальной испытательной машине УМЭ-10Т при точности замера нагрузки 200 Н. Скорость передвижения захватов равнялась $1,67 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Согласно предложенной методике образцами-аналогами служили идентичные по геометрическим характеристикам цилиндры из латуни и стали с известными ФМХ. В процессе нагружения регистрировались осевая сжимающая нагрузка и с помощью тензодатчиков осевые ε_z и окружные ε_φ деформации на наружной поверхности. Путём несложного пересчёта можно построить зависимости $\sigma_z(\varepsilon_z)$ и $\sigma_z(\varepsilon_\varphi)$ (индекс z относится к осевому, φ – к окружному направлениям) и установить величину коэффициента Пуассона по формуле $\nu = \varepsilon_\varphi / \varepsilon_z$ для одинаковых величин осевых напряжений σ_z в зависимостях $\sigma_z(\varepsilon_z)$ и $\sigma_z(\varepsilon_\varphi)$.

На первом этапе был осуществлён выбор физической модели ПМ данного образца. На рис. 1 приведены начальные участки полученных в ходе экспериментов на статическое сжатие зависимостей осевых деформаций ε_z от

величины осевых сжимающих напряжений σ_z в цилиндрических образцах из стали (кривая 1), ПМ (кривая 2) и латуни (кривая 3).

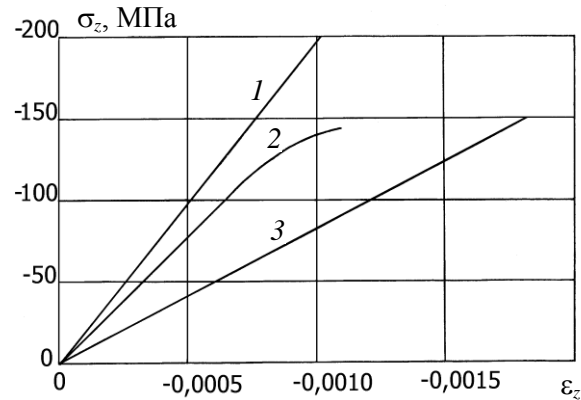


Рис. 1. Экспериментальные зависимости осевых деформаций ε_z от осевых напряжений σ_z при сжатии трубчатых образцов:
1 – сталь; 2 – ПМ; 3 – латунь

Представленные на рис. 1 результаты экспериментов показывают, что материал образцов из ПМ ведет себя аналогично традиционным материалам, и эта зависимость для ПМ качественно совпадает с подобными зависимостями для традиционных конструкционных материалов, например Ст. 3, латуни. Поскольку для этих материалов широко используется модель упругопластического тела с линейным упрочнением, принимается, что такая физическая модель справедлива и для ПМ. Кроме того, при обработке результатов экспериментов и проведении численных расчётов использовалось предположение о том, что ПМ обладают изотропией и однородностью ФМХ. Таким образом, полученные результаты экспериментов свидетельствуют о возможности применения соотношений деформационной теории пластичности в форме теории малых упругопластических деформаций А.А. Ильюшина для образцов-свидетелей из ПМ. Более того, оказалось возможным использовать аппроксимацию зависимости $\sigma_z(\varepsilon_z)$ двухзвенной ломаной, характерной для диаграммы упругопластического материала с линейным упрочнением. Из представленных на рис. 1 результатов видно, что характеристики для данного ПМ находятся между аналогичными ФМХ стали и латуни. Следует отметить, что результаты экспериментов дают соответственно следующие значения модуля упругости стали, латуни и ПМ: $1,9 \cdot 10^5$, $8,5 \cdot 10^4$, $1,53 \cdot 10^5$ МПа. Первые две величины достаточно хорошо согласуются с результатами экспериментов на одноосное растяжение стандартных цилиндрических образцов. Это даёт основание считать реальной полученную величину модуля упругости для ПМ.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что в целом аппарат теории малых упругопластических деформаций, хорошо зарекомендовавший себя для таких конструкционных материалов, как сталь и латунь, должен дать неплохие результаты и для ПМ, по крайней мере, при расчёте деталей при осевом сжатии.

Поскольку значения констант, характеризующих свойства материала, можно определить по кривой зависимости интенсивностей напряжений от интенсивностей деформаций $\sigma_i(\varepsilon_i)$ (см., например, работы [3, 4] и др.), необходимо перейти к этой зависимости.

Переход от экспериментально полученной зависимости $\sigma_z(\varepsilon_z)$ к зависимости $\sigma_i(\varepsilon_i)$ составляет второй этап предложенной методики определения упругих констант ПМ цилиндрического образца-свидетеля.

На рис. 2 приведены полученные расчётным путем с помощью вариационно-разностного метода (ВРМ) кривые 1 – $|\sigma_z(\varepsilon_z)|$ и 2 – $\sigma_i(\varepsilon_i)$ для одного и того же упругопластического материала с некоторыми гипотетическими ФМХ (модуль упругости $E = 2,4 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, деформация начала текучести $\varepsilon_T = 0,0009$, модуль упрочнения $E_1 = 1650$ МПа) при осевом сжатии цилиндрического образца с описанными выше размерами.

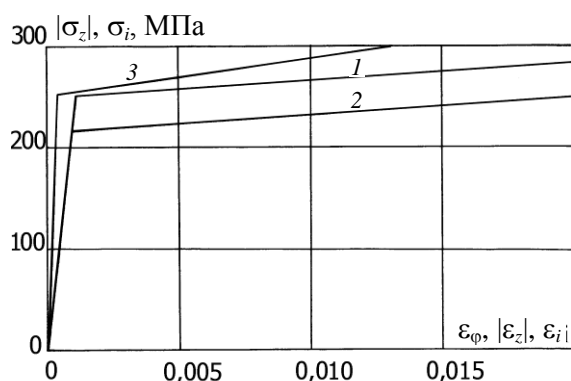


Рис. 2. Расчётные зависимости при сжатии трубчатых образцов:

1 – осевых напряжений $|\sigma_z|$ от осевых деформаций ε_z ; 2 – интенсивности напряжений σ_i от интенсивности деформаций ε_i ; 3 – осевых напряжений σ_z от окружных деформаций ε_ϕ

Если в упругой области кривые практически совпадают, то за пределами упругости разница между напряжениями $|\sigma_z|$ и σ_i (соответственно кривые 1 и 2) при равенстве деформаций ε_z и ε_i составляет 13–14 % и практически не изменяется при дальнейшем нагружении. Проведенные расчёты для цилиндрических образцов данной геометрии и широкого диапазона осевой нагрузки позволили установить подобие кривых $\sigma_i(\varepsilon_i)$ и $|\sigma_z(\varepsilon_z)|$

$$\sigma_i(\varepsilon_i) = k \cdot |\sigma_z(\varepsilon_z)|, \tag{1}$$

причем в пределах упругости коэффициент подобия $k \approx 1$ (рис. 2), а за пределами упругости $k \approx 0,865$.

Считая, что полученное для гипотетического материала свойство подобия кривых $\sigma_i(\varepsilon_i)$ и $|\sigma_z(\varepsilon_z)|$ (1) распространяется и на другие упругопласти-

ческие материалы с линейным упрочнением, для которых зависимость $\sigma_i(\varepsilon_i)$ аппроксимируется двухзвенной ломаной, с помощью найденного коэффициента подобия k можно перейти от экспериментально полученной зависимости $|\sigma_z(\varepsilon_z)|$ для ПМ к кривой $\sigma_i(\varepsilon_i)$, являющейся универсальной характеристикой материала. По существу, этот прием аналогичен общепринятой процедуре построения зависимости $\sigma_i(\varepsilon_i)$ на основе экспериментов на одноосное растяжение-сжатие стандартных образцов для изотропных материалов.

Осесимметричное упругопластическое НДС цилиндрических образцов рассчитывалось вариационно-разностным методом, основанным на вариационном принципе Лагранжа [5]. Расчётная методика апробирована на решении упругопластических тестовых задач, имеющих аналитическое решение. Поэтому сама по себе она практически не вносит погрешностей в описанную процедуру определения ФМХ для ПМ.

Следует отметить, что объём информации о НДС конструкции, получаемый расчётом, намного больше, чем получаемый из экспериментальных исследований, т. к. в расчётах можно исследовать параметры НДС в виде всех компонент тензоров напряжений и деформаций в любой точке конструкции с точностью до шага пространственной сетки. Так, на рис. 2 кривая 3 показывает полученную расчётом зависимость осевых напряжений от окружной деформации $|\sigma_z(\varepsilon_\phi)|$. Очевидно, такого рода зависимости можно построить и для других компонент тензоров напряжений и деформаций, что удобно при сопоставлении с ограниченными, вообще говоря, экспериментальными данными.

На рис. 3 приведены экспериментально полученная зависимость $\sigma_z(\varepsilon_z)$ для ПМ (кривая 1) и её аппроксимация двухзвенной ломаной (кривая 2) для образцов с теми же геометрическими размерами. Переходя с помощью описанной выше методики к зависимости $\sigma_i(\varepsilon_i)$ для того же материала, можно провести расчёт НДС при любом заданном нагружении. В случае аппроксимации зависимости $\sigma_i(\varepsilon_i)$ двухзвенной ломаной линией необходимо иметь четыре параметра: модуль упругости E , коэффициент Пуассона ν , деформацию начала текучести ε_T и модуль упрочнения E_1 . За пределом упругости переход от экспериментальной кривой $\sigma_z(\varepsilon_z)$ к зависимости $\sigma_i(\varepsilon_i)$ осуществляется с помощью полученного выше коэффициента подобия k умножением значения деформации начала текучести ε_T кривой $|\sigma_z(\varepsilon_z)|$ на величину $k = 0,865$.

Как видно из результатов, представленных на рис. 2 кривыми 1 и 2, для которых коэффициент подобия $k = 1$, величина модуля упругости E корректировке не подвергается. Для определения модуля упрочнения материала E_1 используется известное соотношение

$$E_1 = \frac{\sigma_B - \sigma_T}{\varepsilon_B - \varepsilon_T},$$

где σ_B – временное сопротивление; ε_B – деформация, соответствующая напряжению σ_B на условной диаграмме напряжений.

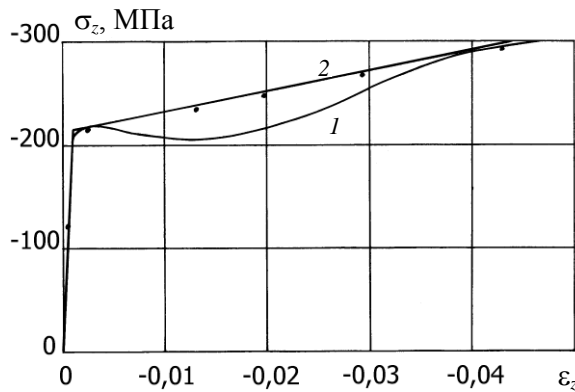


Рис. 3. Экспериментальная зависимость осевых напряжений σ_z от осевых деформаций ε_z (кривая 1), её аппроксимация (кривая 2); точками показаны результаты расчётов

Точками на рис. 3 показаны расчётные параметры НДС средней части наружной поверхности образца при разных значениях осевой сжимающей нагрузки. При одинаковых значениях деформаций ε_z разница в осевых напряжениях σ_z , полученных расчётным путём и из эксперимента, составляет около 1,5 %, при одинаковых окружных деформациях ε_ϕ разница в напряжениях σ_z не превышает 7 %.

На рис. 4 приведены расчётно-экспериментальные результаты для случая нагружения осевой сжимающей силой P цилиндрических образцов, полученных из железграфитового порошка ЖГр1. Геометрические размеры образцов следующие: длина – $8,0 \cdot 10^{-2}$ м, внутренний диаметр – $2,0 \cdot 10^{-2}$ м, внешний диаметр – $2,6 \cdot 10^{-2}$ м. Для аппроксимации экспериментальной зависимости $|\sigma_z(\varepsilon_z)|$ (кривая 3) также использовалась двухзвенная ломаная линия, обозначенная пунктиром. Кривую 1 представлена экспериментальная зависимость $|\sigma_z(\varepsilon_\phi)|$. На этом же рисунке кривыми 2 и 4 представлены расчётные зависимости $|\sigma_z(\varepsilon_z)|$ и $\sigma_i(\varepsilon_i)$ соответственно. Точками на рис. 4 показаны расчётные контрольные значения зависимости $|\sigma_z(\varepsilon_z)|$ в средней части наружной поверхности образца для уточненных значений ФМХ. Величины искомых характеристик ПМ получились следующими: $E \approx 1,23 \cdot 10^5$ МПа; $\nu \approx 0,3$, $\varepsilon_T \approx 0,00114$, $E_1 \approx 3700$ МПа.

Следует отметить, что для рассмотренных в этом примере цилиндрических образцов с другой геометрией и иными значениями упругих констант коэффициент подобия k для расчётных кривых $\sigma_i(\varepsilon_i)$ имеет практически те же значения, что и в предыдущем примере. Проведенные расчёты НДС цилиндрических образцов для различных значений толщины и длины исследуемого цилиндра показали, что обнаруженное подобие расчётных кривых $\sigma_i(\varepsilon_i)$ и $|\sigma_z(\varepsilon_z)|$ имеет место, а коэффициент подобия k имеет те же значения. Ис-

следование влияния величины коэффициента Пуассона за пределом упругости выявило факт стремления коэффициента подобия k к единице с увеличением величины ν с 0,3 до 0,499. Итак, при осевом сжатии цилиндрического образца для значения коэффициента Пуассона $\nu \approx 0,5$ имеем равенство $\sigma_i(\varepsilon_i)$ и $|\sigma_z(\varepsilon_z)|$ для всего процесса его упругопластического деформирования.

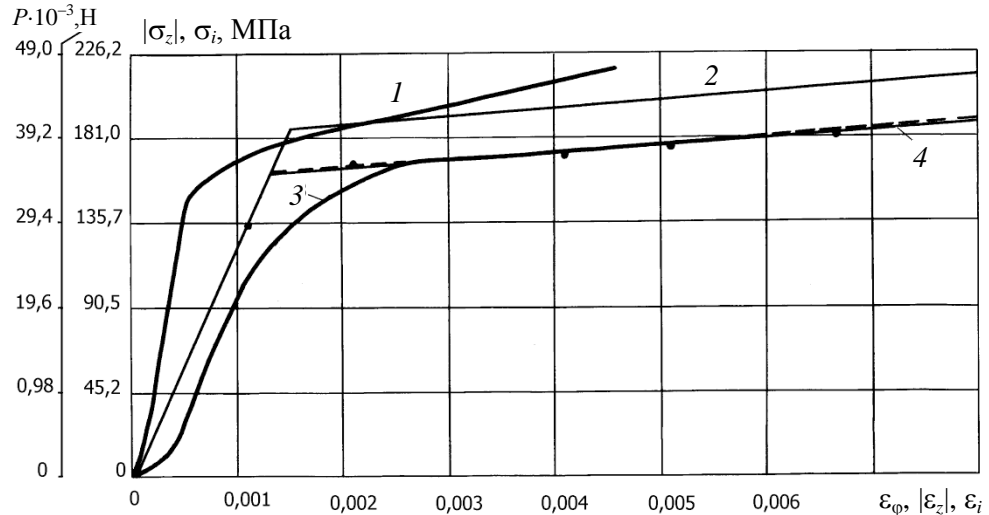


Рис. 4. Результаты расчётно-экспериментального анализа цилиндрических образцов из ПМ: 1, 3 — экспериментальные зависимости $|\sigma_z(\varepsilon_\phi)|$, $|\sigma_z(\varepsilon_z)|$; 2, 4 — расчётные зависимости $|\sigma_z(\varepsilon_z)|$, $\sigma_i(\varepsilon_i)$

Таким образом, для данного вида нагружения предложенная методика восстановления ФМХ по неполной экспериментальной информации себя оправдывает. Однако возникает вопрос, насколько объективными являются эти ФМХ, т. е. в какой мере это характеристики материала, а в какой они отражают ещё и геометрию, и условия нагружения конструкции. Поэтому необходима оценка возможности использования полученных из одного вида испытаний ФМХ для расчёта конструкций при других видах нагрузки.

С этой целью после определения ФМХ из серии экспериментов по осевому сжатию цилиндрических образцов из ПМ проводилась вторая серия экспериментов — по внутреннему давлению. Это давление создавалось за счёт осевого сжатия сплошного полимерного заполнителя, плотно заполняющего внутреннюю полость цилиндра. Величина давления, передаваемого на стенки цилиндрического образца, определялась с помощью одномерной квазистатической модели заполнителя по формуле

$$P_{zap} = -(\sigma_z \sin^2 \alpha + \sigma_r \cos^2 \alpha)_{zap},$$

которая была получена для тела вращения в работах [6, 7]. Здесь α — угол между касательной к внутренней поверхности цилиндрического образца и его продольной осью z . Для оценки погрешности использования предложенной

модели были проведены расчёты для тела вращения при действии массовых сил большой интенсивности при использовании двумерной модели заполнителя. Отмечено достаточно хорошее совпадение результатов, отражающее физическую картину деформирования конструкции. При этом время решения задачи с одномерной моделью на порядок меньше.

Проведённые эксперименты по внутреннему давлению показали, что зависимость $\sigma_z(\varepsilon_z)$ ПМ также можно аппроксимировать двухзвенной ломаной линией. Таким образом, первая серия экспериментов на осевое сжатие служит для определения ФМХ, вторая – для контроля их применимости при любом другом НДС.

Из приведенных результатов следует, что применяемая модель поведения ПМ при квазистатическом нагружении и определённые в рамках этой модели физико-механические характеристики позволяют получить параметры НДС расчётным путем, причём при этом наблюдается неплохое совпадение с экспериментом.

Описанный феноменологический подход к ПМ как континууму согласуется с известными работами, например [8–10], и позволяет исследовать НДС конструкций из ПМ с помощью методов теории упругости и деформационной теории пластичности. Установлено, что:

1. Определять физико-механические характеристики порошковых материалов следует на изготовленных из них деталях, поскольку свойства материала формируются в процессе изготовления деталей.

2. Для исследованных порошковых материалов при расчёте напряженно-деформированного состояния можно использовать модель упругопластического тела с линейным упрочнением, т. к. при всех структурных и физических отличиях порошковый материал при механическом квазистатическом нагружении феноменологически ведет себя аналогично большинству традиционных конструкционных материалов.

Авторы благодарят профессора Б.А. Люкшина за обсуждение результатов статьи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Писаренко, Г.С. О механической прочности материалов и элементов конструкций / Г.С. Писаренко // Проблемы прочности. – 1984. – № 1. – С. 3–5.
2. Батуев, Г.С. Испытательная техника: справочник: в 2 т. / Г.С. Батуев, В.С. Голубков, В.В. Клюев; под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1982. – Т. 1. – 528 с.
3. Ильюшин, А.А. Упруго-пластические деформации полых цилиндров / А.А. Ильюшин, П.М. Огибалов. – М.: Изд-во МГУ, 1960. – 227 с.
4. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
5. Барашков, В.Н. Расчёт напряжённо-деформированного состояния толстых плит вариационно-разностным методом при действии разнонаправленных внешних нагрузок / В.Н. Барашков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 4. – С. 67–80.
6. Люкшин, Б.А. Динамика цилиндрической оболочки с легким заполнителем / Б.А. Люкшин, В.Г. Потейко // Прикладная механика. – 1977. – Т. XIII. – № 1. – С. 116–120.
7. Барашков, В.Н. Статический и динамический расчет оболочек вращения с заполнителем / В.Н. Барашков, Б.А. Люкшин, В.Г. Потейко // Труды XII Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. – Ереван: Изд-во Ер. ун-та, 1980. – Т. 1. – С. 131–137.

8. *Скореход, В.В.* Условие пластичности пористых тел / В.В. Скореход, Л.И. Тучинский // Порошковая металлургия. – 1978. – № 11. – С. 83–87.
9. *Петросян, Г.Л.* Деформационная теория пластичности пористых материалов / Г.Л. Петросян // Известия вузов. Машиностроение. – 1978. – № 11. – С. 5–8.
10. *Петросян, Г.Л.* Пластическое деформирование порошковых материалов / Г.Л. Петросян. – М. : Металлургия, 1988. – 152 с.

REFERENCES

1. *Pisarenko G.S.* O mekhanicheskoi prochnosti materialov i elementov konstruksii [Mechanical strength of materials and structural elements]. *Problemy prochnosti*. 1984. No. 1. Pp. 3–5. (rus)
2. *Batuev G.S., Golubkov V.S., Klyuev V.V.* Ispytatel'naya tekhnika: spravochnik: V 2-kh tomakh [Test equipment: reference book: in 2 vol.]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1982. V. 1. 528 p. (rus)
3. *Ilyushin A.A.* Uprugo-plasticheskie deformatsii polykh tsilindrov [Elasto-plastic deformation of hollow cylinders]. Moscow: MGU Publ., 1960. 227 p. (rus)
4. *Malinin N.N.* Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti. Uchebnik dlya vuzov [Applied theory of plasticity and creep]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1975. 400 p. (rus)
5. *Barashkov V.N.* Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tolstykh plit variatsionno-raznostnym metodom pri deistvii raznonapravlennykh vneshnikh nagruzok [Stress-strain state analysis of thick plates under multidirectional external loads using variable differential method]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 4. Pp. 67–80. (rus)
6. *Lyukshin B.A.* Dinamika tsilindricheskoi obolochki s legkim zapolnitelem [Dynamics of cylindrical shell with lightweight aggregate]. *Prikladnaya mekhanika*. 1977. V. 13. No 1. Pp. 116–120. (rus)
7. *Barashkov V.N., Lyukshin B.A., Poteiko V.G.* Sticheskie i dinamicheskie raschet obolochek vrashcheniya s zapolnitelem [Static and dynamic analysis of shells of revolution with filler]. *Proc. 12th All-Russ. Conf. on Plate and Shell Theory*. 1980. V. 1. Pp. 131–137. (rus)
8. *Skorokhod V.V., Tuchinskii L.I.* Uslovie plastichnosti poristykh tel [The condition of plasticity of porous bodies]. *Poroshkovaya metallurgiya*. 1978. No. 11. Pp. 83–87. (rus)
9. *Petrosyan G.L.* Deformatsionnaya teoriya plastichnosti poristykh materialov [Deformation theory of plasticity of porous materials]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*. 1978. No. 11. Pp. 5–8. (rus)
10. *Petrosyan, G.L.* Plasticheskoe deformirovanie poroshkovykh materialov [Plastic deformation of powder materials]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1988. 152 p. (rus)