

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Богдановой Нины Анатольевны «Исследование напряженно-деформированного состояния прессовок из воскообразных порошковых материалов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела

1. Актуальность проблемы.

Проектирование современных технологических процессов литья по выплавляемым моделям требует создания математических и численных моделей, а также методик их экспериментального подтверждения. Настоящая диссертационная работа выполнена в рамках одной разрабатываемой перспективной технологии без термического воздействия на модельную композицию, способной повысить точность и бездефектность отливки. Рассматривается заполнение пресс-формы формы прессованием порошкообразного литейного состава, что исключает возникновение усадочных полостей, характерных для технологий заполнения пресс-формы жидким составом, а остаточная пористость материала обеспечивает возможность релаксации средних сжимающих напряжений и предсказуемость поведения. Для внедрения этой технологии требуется изучить и описать вязкоупругопластическое поведение порошкообразного литейного воска в условиях, близких к условиям технологического процесса. Сложность поведения материала усугубляется выраженными дилатансионными эффектами рассматриваемой среды, которая переходит по мере ее сжатия из порошковой в пористую среду. По-видимому, систематически данные свойства порошкообразных восков ранее не изучались, что обуславливает актуальность темы исследования, а также новизну полученных в диссертационной работе результатов.

2. Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 154 наименований и двух приложений, содержит 148 страниц текста с 42 рисунками и 8 таблицами. По структуре и оформлению диссертация и автореферат диссертации соответствуют установленным требованиям.

Во *введении* сформулированы актуальность темы, цель и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, научная новизна результатов, практическая значимость, поддержка в рамках государственного задания, апробация, опубликованность полученных результатов, а также благодарности.

В *первой главе* приводится обзор способов повышения размерно-геометрической точности заготовок, получаемых методом литья по выплавляемым моделям, материалов для изготовления выплавляемых моделей и их теплофизических и механических свойств, а также способов изготовления выплавляемых моделей в разрезе их влияния на размерно-геометрическую точность и качество заготовок. Отдельно описан способ прессования порошкообразных литьевых восков для изготовления точных выплавляемых моделей без термического воздействия на модельную композицию, в контексте которого выполнен обзор моделей, используемых для расчета технологических процессов в порошковой металлургии.

Во *второй главе* описываются используемые методики исследования, экспериментальные и численные. Для рассматриваемых модельных композиций парафина и стеарина в зависимости от их состава исследовалась объемная усадка. Последующие испытания выполнялись для парафина марки Т1. Определены температура плавления, плотность при свободной заливке, а также технологически приемлемый диапазон фракций его стружки. Предложены ключевые испытания для расчетов технологического процесса: свободное сжатие, стесненное сжатие, экструзия и прессование в узкой щели. Описана методика испытания на свободное сжатие, из которого определяются кривая сопротивления деформации, модуль упругости и предельная деформация. Описана методика испытания на стесненное сжатие, из которого определяются кривые уплотнения в зависимости от скорости деформации и кривые релаксации напряжений в зависимости от остаточной пористости материала. Описана методика для экспериментального изучения зависимости точности поперечного размера прессовки (упругого отклика) при экструзии воскообразного порошкового материала в зависимости от размера фракции и скорости перемещения пресс-пуансона, а также зависимости плотности прессовки от соотношения площади поперечных сечений пресс-формы и диффузора и контроля температурного режима в ходе испытаний. Описана методика для экспериментального изучения влияния начальной упаковки, доли труднодеформируемой компоненты и скорости прессования на однородность деформирования слоя крупных гранул материала при прессовании в узкой щели. Три последних испытания являются оригинальными. Дополнительно предусмотрено численное изучение особенностей процесса прессования в узкой щели в пакете программ QForm 3D.

В *третьей главе* изучаются особенности напряженно-деформированного состояния порошкового и гранулированного парафина марки Т1 при его уплотнении в закрытых пресс-матрицах. Порошковый материал испытывался в матрице цилиндрической формы. Описана

трехстадийность рассматриваемого процесса. Приведены кривые уплотнения парафиновой стружки двух размерных фракций для двух значений начальной пористости материала, а также кривые релаксации напряжений для них. Определена подходящая аппроксимация кривых уплотнения и релаксации всех рассматриваемых материалов. Для рассматриваемого диапазона значений начальной пористости определен предел прочности на свободное сжатие цилиндрических образцов двух рассматриваемых размерных фракций материала. Представлены результаты исследования влияния начальной упаковки, доли твердых частиц и скорости движения пресс-пуансона при деформировании слоя крупных сферических гранул парафина марки Т1 в закрытой пресс-матрице щелевидной формы. Здесь также выявлена стадийность процесса и ее зависимость от насыпной плотности. Обнаружено, что при наибольшей величине скорости прессования из двух значений начинают развиваться неравномерности деформации (плотности материала) по высоте образца. Для всех испытаний определены кривые релаксации напряжений в течение 20 минут. Установлено, что выдержка уменьшает отклонение поперечного размера образца от аналогичного размера матрицы на порядок. Представлены результаты численного изучения прессования слоя крупных гранул материала с недеформируемой компонентой в щелевидной матрице в упругопластической постановке без учета зависимости от скорости деформации. Кривые прогнозируемой зависимости нагрузки от деформации качественно соответствуют эксперименту.

В *четвертой главе* исследована зависимость упругого последствия и неравномерностей диаметра цилиндрической прессовки, а также кривой напряжение-деформация, в зависимости от скорости прессования, размера фракции и формы диффузора при экструзии порошкообразного парафина Т1. Следует отметить, что это испытание наиболее ярко демонстрирует переход от объемного к сдвиговому вязкопластическому течению и его зависимость от скорости и размера фракции. Измерено приращение температуры материала в очаге сдвиговой деформации и установлено, что увеличение скорости экструзии в 6 раз повышает температуру на ~2 градуса, но температура плавления не достигается. Установлены период и амплитуда волнообразной неравномерности цилиндрической заготовки вследствие упругого отклика в зависимости от скорости прессования, размера фракции и формы диффузора. Все эти данные можно использовать при построении определяющих уравнений вязкоупругопластичности материала.

В *заключении* сформулированы основные выводы и научные результаты работы.

Приложения содержат копии двух патентов на изобретения.

3. Теоретическая значимость результатов и их научная новизна.

В работе раскрыты закономерности вязкоупругопластического поведения порошковых воскообразных материалов в широком диапазоне воздействий в условиях сдвигового течения и сжимающего среднего напряжения, проявляющих уплотнение и дилатансию, не исследованного в должной мере и необходимого для построения определяющих уравнений материала и математических моделей процесса заполнения пресс-форм для литья по выплавляемым моделям с целью подбора рациональных технологических параметров.

4. Практическая значимость результатов диссертации.

Разработанная методика, включающая стандартные и нестандартные экспериментальные исследования вязкоупругопластических свойств порошковых воскообразных материалов в широком диапазоне воздействий, а также результаты испытаний ряда материалов, необходимы для выбора благоприятных режимов заполнения пресс-форм для обеспечения точности и бездефектности тонкостенных металлических отливок, получаемых по выплавляемым моделям, и востребованы в машиностроении и металлургии.

5. Достоверность результатов диссертации.

Достоверность результатов исследований обеспечивалась избыточностью комплекса предложенных в работе базовых испытаний материала и подтверждается повторяемостью результатов каждого испытания с точки зрения статистической обработки эксперимента.

6. Апробация работы.

Основные результаты диссертации Н.А. Богдановой опубликованы в семи статьях в рецензируемых научных журналах (три из которых входят в международные системы цитирования, четыре — в перечень ВАК), содержатся в двух патентах на изобретения и докладывалась на шести международных и всероссийских конференциях по профилю механики деформируемого твердого тела. Полностью работа докладывалась на научном семинаре Института машиноведения и металлургии ДВО РАН.

Работа выполнялась в рамках планов НИР рамках плана НИР Института машиноведения и металлургии ДВО РАН, результаты которых проходят полноценную научную экспертизу.

7. Замечания и вопросы по содержанию работы.

1. В таблице 2.1, вероятно, допущена неточность. Судя по всему то, что названо “высотой, на которой произошло разрушение” Δg есть отношение высоты, при которой произошло разрушение, к начальной высоте цилиндрического образца. Тогда предельная деформация $\epsilon_c = 1 - \Delta g$. Кривая сопротивления деформации на рисунке 2.8, полученная из той же серии испытаний, также нуждается в коррекции шкалы деформаций. А вот модуль упругости по данным той же серии испытаний определен правильно. Но при

этом необходимо заметить, что для пластичных материалов с плохо выраженным пределом текучести модуль упругости рекомендуется определять, выполняя разгрузку или разгрузки через некоторые интервалы.

2. Необходимо заметить, что из данных испытаний в закрытой форме по программе с разгрузками можно было определить упругий модуль при стесненном сжатии, из которого вместе с уже определенным упругим модулем при свободном сжатии — определить коэффициент Пуассона и модуль объемного сжатия. Причем все это можно проделать в зависимости от пористости.

3. На стр.64-65 присутствуют фразы “в ходе релаксации напряжений в прессовке ее размер увеличивается на 0,4-1,2% от номинального”, “...упругого отклика, возникающего за счет релаксации напряжений в прессовке после снятия нагрузки...”, в которых термин “релаксация напряжений” применяется нестандартно. На странице 71 реальная релаксация названа “разгрузкой”. Хотя в остальных местах термин использован корректно.

4. В чем причина различия кривых уплотнения одной фракции от насыпной плотности $\sim 0,4 \text{ г/см}^3$ до плотности $0,76 \text{ г/см}^3$ на рисунке 3.1? Различные скорости прессования?

5. Автор предложил считать показатель a в законе Ждановича подгоночным параметром, в результате чего данный закон превратился в степенной. Хотя этого оказалось достаточно для хорошего описания кривых уплотнения, в прикладных пакетах механики деформируемого твердого тела имеются лучшие варианты аппроксимации.

6. На рисунке 3.5 аппроксимации кривых релаксации “полиномиальными зависимостями третьего порядка” скорее похожи на кубические сплайны.

7. Для формулировки вывода на странице 86 “чем больше напряжение, тем больше время релаксации” необходимо больше систематических испытаний. Вязкоупругие свойства материала зависят от истории нагружения (в частности, от скорости на этапе нагружения).

8. Находятся ли в одной закономерности времена релаксации напряжений парафина T_1 до уровня 5-10% в зависимости от начальной пористости а) для прессования стружки в замкнутой цилиндрической полости (рис. 3.5) и б) прессования слоя крупных гранул в щели (рис. 3.11)? Существуют определенные сомнения относительно того, что свойства совокупности заполняющих элементов с поперечным размером, равным ширине щели, сопоставимы со свойствами реального порошкообразного материала, то есть — относительно представительности схемы с однослойным заполнением.

Указанные вопросы и замечания не ставят под сомнение положения, выносимые на защиту, но требуют комментариев. Замечания в целом не меняют общего положительного впечатления от диссертационной работы.

8. Заключение по диссертации.

Диссертация представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой экспериментально установлены благоприятные режимы заполнения пресс-форм порошковыми воскообразными материалами для обеспечения точности и бездефектности тонкостенных металлических отливок, получаемых по выплавляемым моделям. Диссертационная работа Богдановой Нины Анатольевны «Исследование напряженно-деформированного состояния прессовок из воскообразных порошковых материалов» выполнена на высоком научно-методическом уровне и отвечает всем требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 года (в редакции от 18.03.2023 года), а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент:

заведующий лабораторией нелинейной механики деформируемого твердого тела Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН) — филиала ФГБУН Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, доктор физико-математических наук (01.02.04), доцент

07 ноября 2023 года

 Келлер Илья Эрнстович

Служебный телефон: +7(342)2378307 E-mail: kie@icmm.ru

Служебный адрес: 614013, г.Пермь, ул. Акад. Королёва, д.1, ИМСС УрО РАН

Подпись И.Э. Келлера заверяю
Ученый секретарь ИМСС УрО РАН

 Юрлова Н.А.