

Койдан Иван Михайлович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТИКСОШТАМПОВКИ
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АЗ57**

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва 2013 г.

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель- **Евсюков Сергей Александрович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Конкевич Валентин Юрьевич**
доктор технических наук, профессор, главный
научный сотрудник ОАО ВИС

Третьюхин Виталий Вячеславович
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник государственного инжинирингового
центра «Центр разработки кузнечно-прессового
оборудования» при ФГБОУ ВПО МГТУ
«СТАНКИН»
Ведущая организация- ФГБОУ ВПО «Тульский государственный
университет»

Защита состоится «25» 02 2014г. в 14 ч. 30 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.141.04 в Московском государственном
техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:

105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим
направлять по указанному адресу

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан «23» 01 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 112.141.04

кандидат технических наук, доцент

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2045427

Копдан И. М. Совершенствована

Семенов Д.П.

Актуальность темы

Сегодня в мире можно заметить значительное повышение интереса к технологиям твёрдожидкого деформирования (тиксотехнологиям). Такой интерес обоснован в первую очередь рядом особенностей, отличающих её от общеизвестных технологий обработки давлением и литья. Тиксоштамповка позволяет получать поковки высокого качества за один штамповочный переход при незначительных, в сравнении с традиционной штамповкой, энергетических затратах на деформирование. Как правило, геометрия поковки максимально приближена к геометрии детали и имеет повышенные механические характеристики. Характерным признаком тиксоформования является обеспечение в изделии высоких механических свойств за счет получения мелкозернистой глобулярной однородной микроструктуры.

Основная сложность внедрения процессов твёрдожидкого деформирования заключается в том, что в тиксотехнологиях отсутствуют установленные рекомендации по подбору параметров штамповки для изготовления той или иной детали. Технологические режимы штамповки имеют узкие интервалы варьирования и могут полностью изменяться при незначительном изменении геометрии требуемой поковки, при изменении типа применяемого оборудования или схемы деформирования. Поэтому для каждой новой детали необходимо проводить предварительные исследования по подбору параметров штамповки, выявлению возможных дефектов и причин их появления, что крайне затруднительно и дорого.

Выходом из создавшейся ситуации может быть замена натурных экспериментов на предварительное компьютерное моделирование. Однако для такой технологии, как твёрдожидкое формоизменение, находящееся на стыке двух общеизвестных технологий пластической обработки давлением и литья, вопрос выбора адекватного метода моделирования процесса течения металлических сплавов до сих пор остаётся открытым.

Специфика моделирования тиксотехнологий такова, что при содержании твёрдой фазы в заготовке до 40-60%, поведение металла во время деформирования целесообразно рассматривать как механику течения вязкой жидкости. С увеличением содержания твёрдой фазы при описании течения металла уже следует учитывать законы из области механики твёрдого тела. При этом в процессе формоизменения твёрдожидкой заготовки происходит постепенный переход жидкой фазовой составляющей заготовки в твёрдое состояние. То есть соотношение твёрдой и жидкой фазы в заготовке изменяется в каждый момент времени. Кроме того следует учитывать, что в процессе деформирования часть заготовки находится в твёрдожидком состоянии, тогда как другая её часть, вследствие соприкосновения со штамповой оснасткой и подсыхания может находиться в твёрдом состоянии.

Учёт этих факторов при моделировании процессов тиксоштамповки в современных общеизвестных программных комплексах является нетривиальной задачей и детально на настоящий момент не разработан.

Цель работы

Сокращение сроков и затрат на разработку процессов тиксоштамповки алюминиевого сплава А357 на основе компьютерного моделирования в программном комплексе QForm.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- на основе анализа современного уровня развития технологии твёрдожидкого формования оценить возможность использования существующих программных комплексов для моделирования процессов тиксоштамповки;
- предложить способ получения реологической модели твёрдожидкого материала для моделирования процессов тиксоштамповки;
- экспериментально получить реологическую модель течения алюминиевого сплава в твёрдожидком состоянии;
- провести сравнительную оценку результатов моделирования процесса тиксоштамповки алюминиевого сплава с использованием полученной реологической модели с результатами аналогичного моделирования в других программных комплексах и с результатами физических экспериментов;
- на основе моделирования с использованием полученной реологической модели определить допустимые параметры технологического процесса тиксоштамповки заготовок поршней компрессора, позволяющие получить высококачественные изделия без внешних и внутренних дефектов.

Методы исследования

Экспериментальные исследования выполнены на алюминиевом сплаве А357 с использованием специализированного оборудования Gleeble-3800 фирмы Dynamic Systems, Inc., США, предназначенного для проведения физического моделирования и механических испытаний, обеспечивающем постоянную скорость деформации и равномерный нагрев заготовки по всему объёму до твёрдожидкого состояния непосредственно в деформирующих бойках. Построение реологической модели течения твёрдожидкого алюминиевого сплава выполнено на основе данных экспериментальных исследований процесса осадки цилиндрической алюминиевой заготовки в тиксосостоянии при различных скоростях деформации и температурах деформирования.

Теоретические исследования проведены на основе численного моделирования процесса тиксоштамповки в программном комплексе моделирования пластических деформаций QForm с использованием полученной реологической модели твёрдожидкого алюминиевого сплава, а также в программном комплексе моделирования течения жидкостей различной вязкости Flow3D.

Экспериментальные исследования тиксоштамповки модельных образцов высоконагруженных поршней дизельных двигателей проведены на универсальном гидравлическом прессе ДБ 2436 усилием 4 МН, оснащённом блоком измерительных приборов съёма основных параметров технологического процесса, с использованием муфельной печи сопротивления

мод. ЮТ-217 «ЮНИТЕРМ» для нагрева заготовок и двух жидкостных горелок на дизельном топливе модели «GIERSCH R1-V(L)» для нагрева штамповой оснастки.

Автор защищает

- реологическая модель твёрдожидкого алюминиевого сплава, полученная на основе экспериментальных исследований, позволяющая моделировать процесс тиксоштамповки алюминиевого сплава А357 в программном комплексе QForm, учитывая свойства металла как в твёрдожидком, так и в твёрдом состоянии;
- результаты осадки цилиндрических алюминиевых образцов в твёрдожидком состоянии, отличающиеся отсутствием бочкообразности формы деформированных образцов и высокой чувствительностью геометрии деформированных образцов к изменению скорости деформации;
- рекомендации по проведению моделирования процессов тиксоштамповки с использованием полученной реологической модели;
- результаты компьютерного моделирование процесса тиксоштамповки алюминиевого сплава в программном комплексе QForm с использованием полученной реологической модели, позволяющие совершенствовать процессы тиксоштамповки алюминиевых сплавов на основе подбора оптимальных параметров формования.

Научную новизну составляют

- полученная на основе экспериментальных исследований реологическая модель, позволяющая моделировать процесс тиксоштамповки алюминиевого сплава А357 в программном комплексе QForm с учетом свойства металла как в твёрдожидком, так и в твёрдом состоянии;
- установленные закономерности формоизменения при осадке цилиндрической алюминиевой заготовки в твёрдожидком состоянии;
- выявлена высокая степень влияния скорости деформации на геометрию деформированных образцов при осадке цилиндрической алюминиевой заготовки в твёрдожидком состоянии;
- результаты экспериментальных исследований процесса деформирования алюминиевых заготовок с глобулярной структурой в твёрдожидком состоянии при различных температурных и скоростных параметрах;
- результаты математического моделирования процесса тиксоштамповки алюминиевых сплавов в программном комплексе QForm моделирования процессов пластического формоизменения.

Достоверность результатов подтверждается использованием современных методов исследования, включающих вычислительные эксперименты с применением метода конечных элементов в программных комплексах QForm, Flow-3D. А также физическими экспериментами, выполненными в институте обработки давлением Штутгартского университета (Германия) на специализированном оборудовании Gleeble-3800 и в ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ» на гидравлическом прессе ДБ2436 с привлечением

современных экспериментальных средств, качественным и количественным согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Практическая значимость

- рекомендации по проведению компьютерного моделирования процессов тиксоштамповки алюминиевого сплава А357, позволяющие адекватно отразить характер течения твёрдожидкого сплава в полости штампа и спрогнозировать возможное возникновение дефектов в поковке;
- способ построения реологической модели твёрдожидкого алюминиевого сплава на основе результатов экспериментальных исследований процесса свободной осадки цилиндрического образца в твёрдожидком состоянии с использованием специализированного испытательного оборудования;
- значения энергосиловых параметров процесса деформирования алюминиевых сплавов в твёрдожидком состоянии в зависимости от скорости деформации и температуры деформирования;
- рекомендации по совершенствованию процесса тиксоштамповки заготовок поршней из алюминиевого сплава для компрессора.

Реализация работы

Предложенные на основе теоретических исследований и компьютерного моделирования рекомендации по подбору технологических параметров процесса тиксоштамповки использованы при совершенствовании технологических процессов формования высоконагружённых поршней дизельного двигателя и корпусов букс вагонов метрополитена методами твёрдожидкого деформирования. Разработанная технология тиксоштамповки модельных образцов поршней с глобулярной структурой из алюминиевого поршневого сплава позволила увеличить механические свойства сплава на 15...30%, показатели пластичности в 2...5 раз. Применение тиксоштампованных алюминиевых корпусов букс позволяет улучшить эксплуатационные характеристики буксовых узлов вагонов метрополитена: достигается повышение ресурса ходовой части вагонов и элементов железнодорожного полотна, а также снижение вибрации, шумности, затрат на техническое обслуживание и ремонт.

Личный вклад состоит

в выполнении экспериментального исследования процесса осадки цилиндрических алюминиевых образцов в твёрдожидком состоянии и определении основных энергосиловых параметров процесса деформирования;

в разработке реологической модели течения твёрдожидкого алюминиевого сплава на основе экспериментальных исследований;

в выполнении математического моделирования различных процессов тиксоштамповки с использованием полученной реологической модели и сопоставлении результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований;

в определении допустимых параметров технологического процесса тиксоштамповки заготовок поршней компрессора, позволяющих получить высококачественные изделия без внешних и внутренних дефектов.

Апробация работы

Основные положения работы доложены и обсуждены на следующих семинарах:

- Всероссийская научно-технической конференции «Студенческая научная весна 2009: Машиностроительные технологии» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009);
- Всероссийская научно-технической конференции «Студенческая научная весна 2010: Машиностроительные технологии» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010);
- 7-я международная научно-практическая конференция «Современные технологии в области производства и обработки цветных металлов» (Москва: ВВЦ, 16-я Международная промышленная выставка «Металл-Экспо 2010», 2010);
- Третья Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010);
- Четвёртая Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011);
- Всероссийская научно-технической конференции «Студенческая научная весна 2012: Машиностроительные технологии» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012);
- 9-я международная научно-практическая конференция «Современные технологии в области производства и обработки цветных металлов» (Москва: ВВЦ, 18-я Международная промышленная выставка «Металл-Экспо 2012», 2012);
- Пятая Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012);
- Научный семинар стипендиатов программ «Михаил Ломоносов II» и «Иммануил Кант II» 2011/2012 г. (Москва: Российско-Немецкий Дом, 2012)

Публикации

Основное содержание диссертационной работы изложено в 11 научных работах, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и одним патенте.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы. Текст диссертации содержит 183 машинописные страницы, включая 9 таблиц и 113 рисунка.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы диссертационной работы и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён анализ современного уровня развития технологии твёрдожидкого формования.

Анализ литературных источников подтверждает высокую заинтересованность в технологиях твёрдожидкого формования со стороны различных отраслей промышленности, что подтверждается наличием большого числа работ в направлении развития технологий получения металла с глобулярной структурой и наличием разработок специализированного оборудования для реализации процесса тиксоформования. На сегодняшний день существует много видов процесса твёрдожидкого формования, однако в диссертации все вопросы рассмотрены применительно к технологии тиксоштамповки. То есть рассматривается деформирование твёрдожидкого металла с относительным содержанием твёрдой фазы от 0.6 до 0.9 от общего объёма металла после предварительного нагрева мерной заготовки с глобулярной структурой перед деформированием.

В главе рассмотрены основные особенности тиксотехнологий, на основании которых сделан вывод о необходимости в применении компьютерного моделирования процессов течения твёрдожидкой заготовки в процессе деформирования в целях совершенствования процессов тиксоштамповки.

Во второй главе рассматриваются основные подходы к созданию реологических моделей и моделированию процессов течения металла в твёрдожидком состоянии. Каждый из используемых методов с различной точностью описывает процесс формоизменения, однако говорить о высокой точности результатов моделирования пока не приходится. Главная проблема заключается в том, что программы моделирования процессов ОМД и литья описывают формоизменение однофазных сплавов, в то время как в тиксотехнологиях формованию подвержены двухфазные сплавы. Кроме того, в процессе формоизменения твёрдожидкой заготовки происходит постепенный фазовый переход жидкой составляющей заготовки в твёрдое состояние. То есть соотношение твёрдой и жидкой фазы в заготовке изменяется в каждый момент времени. Учитывать такие процессы в заготовке современные общеизвестные программные комплексы не в состоянии.

Для описания течения материала под воздействием внешней нагрузки используется его реологическая модель. В программных комплексах она задается либо непосредственно математической зависимостью, либо табличными данными в цифровом выражении с дальнейшей их аппроксимацией встроеными алгоритмами программы.

Для описания реологических свойств твёрдожидкого металла при формоизменении в программных комплексах компьютерного моделирования используют различные математические зависимости. Так в программном комплексе Flow3D моделирование течения тиксотропного материала выполняется на основе задания свойств вязкости неньютоновской жидкости, которая изменяется в зависимости от скорости деформации и температуры деформирования.

$$\mu = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 E_T - \mu_{\infty}}{\lambda_{\infty} + [\lambda_0 + (\lambda_1 E_T)^2 e_{ij} e_{ij}]^{\frac{1-n}{2}}} + \frac{\lambda_2}{\sqrt{e_{ij} e_{ij}}}, \quad (1)$$

где μ – вязкость материала; μ_{∞} – вязкость материала при больших деформациях; μ_0 – начальная вязкость материала; e_{ij} – скорость деформации; λ_{∞} , λ_0 , λ_1 , λ_2 , n – коэффициенты, подбираемые опытным путем; E_T – температурная составляющая.

Однако, как видно из приведённого примера, подобные модели требуют подбора и определения опытным путём большого количества входящих коэффициентов, что приводит в итоге к значительным ошибкам в результатах расчётов. Для определения некоторых составляющих реологической модели требуется в свою очередь также определение ряда констант и параметров.

$$E_T = \exp \left[a \left(\frac{T^*}{T - b} - c \right) \right], \quad (2)$$

где T – текущая температура материала; T^* – исходная температура; a , b , c – коэффициенты, подбираемые опытным путем.

Кроме того, надо учитывать, что модель описания вязкости не учитывает переход части объёма заготовки в твёрдое состояние, вследствие чего результаты моделирования зачастую являются неудовлетворительными.

С аналогичными трудностями сталкиваются при моделировании процессов тиксоформования и в других программных комплексах. Помимо этого, зачастую используемые реологические модели сложны в построении, что так же затрудняет верный подбор значений входящих в эту модель параметров. Поэтому одной из основных задач работы является создание реологической модели течения твёрдожидкого алюминиевого сплава во время формования, которая учитывает основные свойства твёрдожидкого деформирования и не обладает высокой сложностью в построении.

В работе предложен способ построения реологической модели твёрдожидкого алюминиевого сплава на основе данных экспериментальных исследований процесса деформирования алюминиевого образца в твёрдожидком состоянии при различных температурах деформирования и скоростях деформации.

В третьей главе описаны выполненные в работе экспериментальные исследования. Для определения данных, необходимых для построения реологической модели проведён ряд испытаний по осадке цилиндрических алюминиевых заготовок в твёрдожидком состоянии при различных температурах деформирования и скоростях деформации. Экспериментальные исследования проведены на оборудовании института обработки давлением (IFU, Universität Stuttgart) в г. Штутгарт, Германия в рамках программы международного сотрудничества при поддержке Министерства образования и науки РФ и германской службы академических обменов (DAAD).

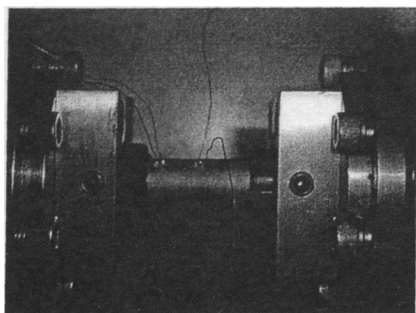


Рис.1.

Вид деформирующих бойков с установленной в них заготовкой

В частности, эксперименты выполнены на специализированном оборудовании, используемом в металлургических и машиностроительных технологиях, Gleeble-3800 фирмы Dynamic Systems, Inc., США, предназначенного для проведения физического моделирования и механических испытаний (Рис.1). Изменение скорости деформации проводилось в интервале от 0,05 до 0,8 с⁻¹, температура нагрева тиксозаготовок составляла 575°C, 577°C и 580°C. Выбранный температурный интервал

соответствует температурному интервалу тиксоштамповки используемого алюминиевого сплава А357.

Для оценки характера течения твёрдого материала во время формоизменения проведен анализ изменения величины сопротивления деформации по ходу деформирования. На основе данных, полученных во время формоизменения, были построены графики зависимости сопротивления деформации σ от величины логарифмической деформации ϵ при различных скоростях деформации и температурах деформирования (Рис.2-4).

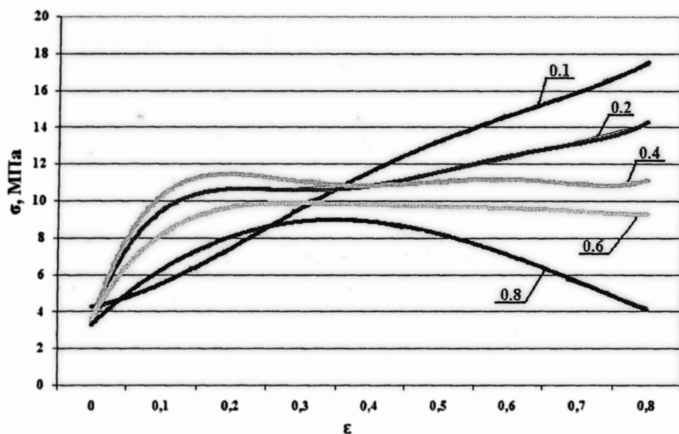


Рис.2.

Кривые сопротивления деформации при температуре 575°C и различных скоростях деформации для твёрдого алюминиевого сплава

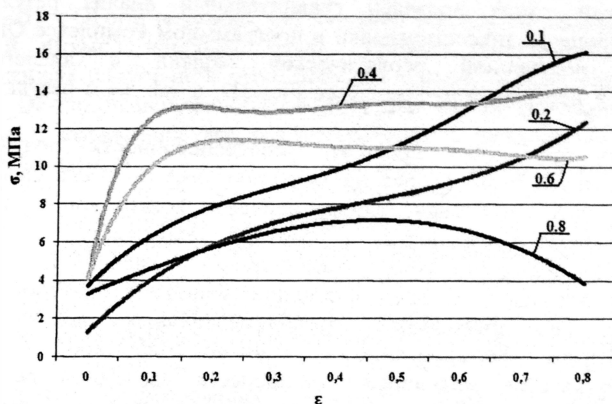


Рис.3.

Кривые сопротивления деформации при температуре 577°C и различных скоростях деформации для твёрдожидкого алюминиевого сплава

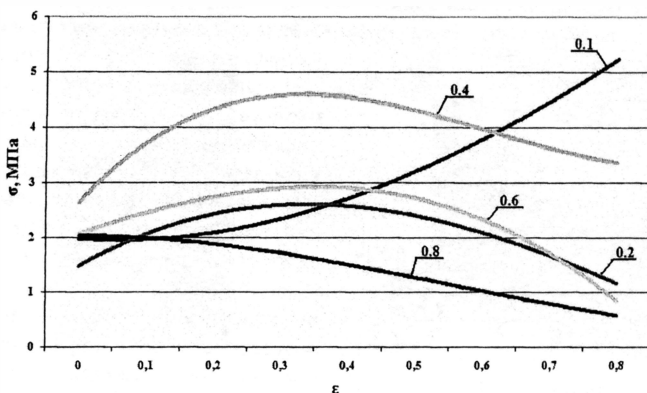


Рис.4.

Кривые сопротивления деформации при температуре 580°C и различных скоростях деформации для твёрдожидкого алюминиевого сплава

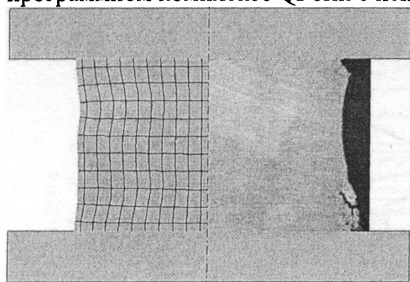
Полученный набор данных, представленный в виде кривых изменения сопротивления деформации по ходу деформирования при различных скоростях деформации и температурах деформирования, был использован в программном комплексе QForm как реологическая модель течения твёрдожидкого алюминиевого сплава в процессе деформирования.

В четвёртой главе проведён сравнительный анализ результатов моделирования процесса тиксоштамповки в программном комплексе QForm с использованием полученной реологической модели с аналогичным моделированием в программном комплексе Flow3D, а так же с результатами экспериментов.

На первом этапе для проверки работоспособности полученных реологических моделей было проведено моделирование процесса свободной осадки цилиндрической заготовки. Однако при этом возник вопрос задания трения на контактных поверхностях в условиях нахождения заготовки в твёрдожидком состоянии. При классической свободной осадке цилиндрического образца в твёрдом состоянии возникает бочкообразность формы. Однако в проводимых экспериментальных исследованиях бочкообразности формы деформированных образцов не наблюдалось.

Анализ результатов моделирования процесса свободной осадки и сопоставление его с результатами экспериментов показал, что при моделировании процессов тиксоштамповки, в случае отсутствия значительного подсыхания металла по ходу деформирования и перехода её части в твёрдое состояние целесообразно задавать трение на контактных поверхностях нулевой величиной (Рис.5).

Дальнейший сравнительный анализ результатов моделирования процесса свободной осадки при различных температурно-скоростных условиях в программном комплексе QForm с использованием полученной реологической



а) б)

Рис.5.

Сравнение геометрии деформированной твёрдожидкой заготовки по результатам моделирования с использованием полученной реологической модели без учёта трения (а) и по результатам экспериментальных исследований (б) при $T_{заг} = 575^{\circ}\text{C}$, $V=21 \text{ мм/с}$

модели и реальных экспериментов показывает высокую степень сходства. Геометрия деформированных заготовок, характер течения твёрдожидкого металла показали высокую чувствительность к изменению скорости деформирования. При этом общим характерным отличием от классической осадки является отсутствие бочкообразности и интенсивное течение металла вблизи деформирующих поверхностей.

Для дальнейшей оценки полученной реологической модели было проведено сравнение результатов моделирования в программном комплексе QForm с результатами моделирования в Flow3D и экспериментальными

исследованиями, проведёнными в Институте обработки давлением Штутгартского университета.

Результаты физического эксперимента и математического моделирования в Flow-3D и QForm показали, что характер течения твёрдожидкой суспензии в полости штампа наиболее точно отражает моделирование в QForm с применением полученной реологической модели (Рис.6). Кроме того, в этом случае QForm позволяет отобразить возможность формирования зажима в поковке и дальнейшее его распространение в процессе течения металла в штампе в области 1 и 2 (Рис.6а). Как видно из результатов моделирования, QForm при использовании новой реологической модели чётко отражает возможность образования зажима в области 1 и 2 (Рис.6в), тогда как результаты моделирования в Flow-3D не указывают на возможность образования такого дефекта. Зажим в поковке в области 1 (Рис.6) образуется вследствие подстывания части металла при его соприкосновении с более холодной штамповой оснасткой. При этом часть металла перестаёт вести себя как вязкая жидкость и переходит в твёрдое состояние, для которого характерна возможность формирования зажимов. Моделирование в Flow-3D, описывающего материал как вязкую суспензию, не учитывает свойства твёрдого тела, в том числе при остывании заготовки до температуры ниже линии солидус.

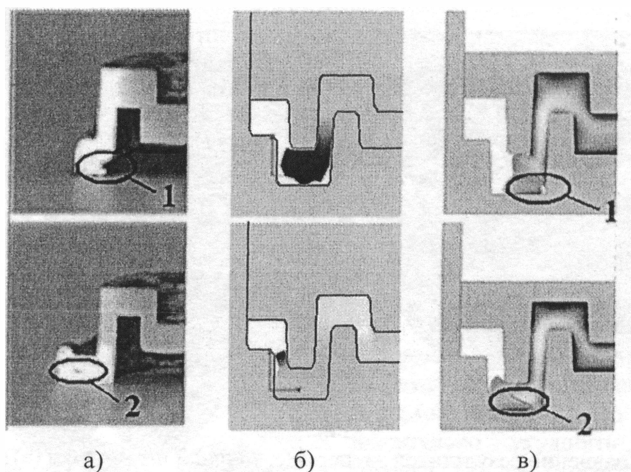


Рис.6.

Сравнение хода заполнения штампа по результатам экспериментов (а), моделирования в программных комплексах Flow3D (б) и QForm с использованием реологической модели «thixotropic» (в)

В пятой главе выполнены экспериментальные исследования по совершенствованию технологического процесса тиксоштамповки заготовки поршня компрессора. Подбор оптимальных параметров тиксоштамповки проведён с применением компьютерного моделирования в программном комплексе QForm с использованием полученной реологической модели.

Экспериментальная тиксоштамповка модельных образцов поршней проведена в ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ» на универсальном гидравлическом прессе ДБ 2436 усилием 4 МН.

По ходу отработки указанного технологического процесса в ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ» долгое время не удавалось получить качественное изделие. В поковке имелось значительное количество дефектов в виде трещин и незаполнения полости штампа.

Результаты моделирования в программном комплексе QForm с использованием полученной реологической модели позволили верно определить области возможного возникновения дефектов в поковке, а так же определить причину возникновения таких дефектов и способы их устранения. Моделирование показало, что используемые технологические параметры тиксоштамповки не позволяют заполнять полость штампа металлом в твёрдожидком состоянии. В определённых областях штампового пространства твёрдожидкий металл испытывает значительное подстывание и теряет свойства жидкотекучести (Рис.7). Поэтому дефекты сосредоточены преимущественно в областях поршня, где отсутствует утолщение стенки.

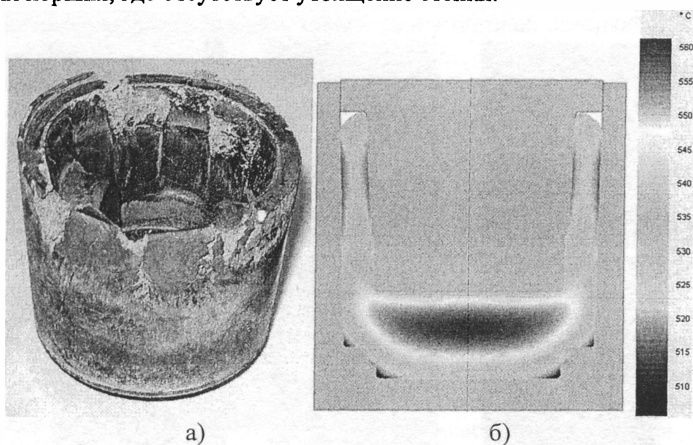


Рис.7.

Сравнение результатов экспериментальной штамповки (а) и математического моделирования (б)

С целью получения качественной поковки, было предложено увеличение скорости деформирования при сохранении прочих параметров технологического процесса и проведено моделирование с новыми технологическими параметрами. Результаты моделирования показали, что в конце хода деформирования металл заготовки в большей части своего объёма остаётся в твёрдожидком состоянии, что позволяет говорить о возможности получения высококачественного изделия.

Дальнейшие эксперименты показали, что предложенные на основании моделирования параметры тиксоштамповки позволили значительно улучшить качество поковки. Металл стал полностью оформлять полость штампа без

образования каких-либо дефектов как на поверхности поковки, так и во внутренних её областях (Рис.8).

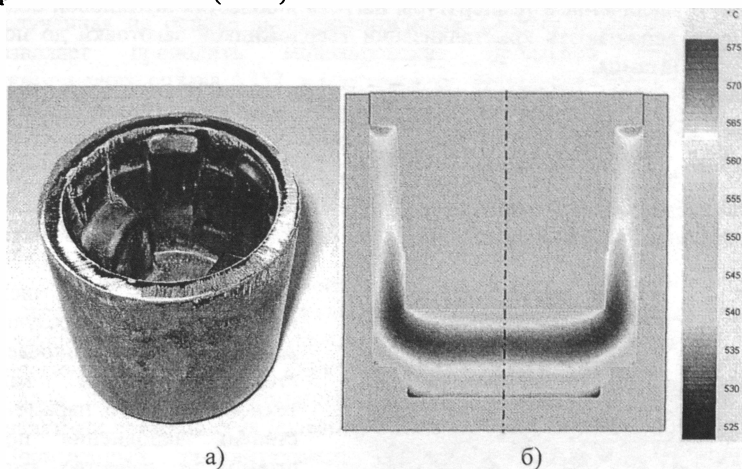


Рис.8.

Сравнение результатов экспериментальной штамповки (а) и математического моделирования (б) по предложенным на основании моделирования технологическим параметрам

Результаты моделирования позволили сделать вывод, что наиболее целесообразным способом устранения дефектов при штамповке является увеличение скорости деформирования, что подтвердилось результатами экспериментов, позволивших стабильно получать высококачественные изделия (Рис.9).



Рис.9.

Партия отштампованных изделий

Однако моделирование так же указало на возможность деформационного разогрева при значительном увеличении скорости деформирования, что может значительно ухудшить качество поковки. Так при скорости 100мм/с величина возможного деформационного разогрева составляет 6°С, что в условиях тиксоштамповки является существенной величиной и ограничивает, таким образом, возможности по увеличению скорости деформирования. Как

показали результаты моделирования, значительному подстыванию подвержена заготовка лишь в определённых областях штамповой оснастки. Данный факт

говорит о целесообразности применения неравномерного нагрева штамповой оснастки с увеличением температуры нагрева в областях штамповой оснастки, где велика вероятность кристаллизации твёрдожидкой заготовки до полного заполнения штампа.

Аналогичные трудности возникали при разработке технологического процесса тиксоштамповки модельного образца буксы вагона метрополитена в ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ». В ходе экспериментальных исследований возникали значительные трудности, связанные с незаполнением полости штампа твёрдожидким металлом. Кроме того, возникали многочисленные дефекты в виде трещин и раковин на поверхности поковки. На основе изучения

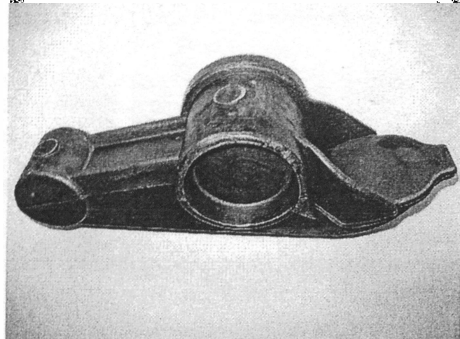


Рис.10.

Модельный образец буксы вагона метрополитена, полученный методом тиксоштамповки

причин возникновения таких дефектов, в том числе с использованием результатов моделирования, определения степени влияния каждого технологического параметра на степень заполнения полости штампа и качество готового изделия было предложено увеличение скорости деформирования и температуры нагрева штамповой оснастки. Такая корректировка технологических параметров тиксоштамповки позволила получить высококачественное

изделие без образования дефектов (Рис.10).

Общие выводы и результаты работы

1. Программные комплексы, использующие однофазную реологическую модель для моделирования процессов твёрдожидкого формоизменения, не позволяют учесть постепенный переход части заготовки из твёрдожидкого состояния в твёрдое. При этом создание специализированных программных комплексов, исключительно для моделирования технологических процессов твёрдожидкого формоизменения может оказаться дорогим и неоправданным. Поэтому целесообразна доработка уже имеющихся программ моделирования процессов пластического деформирования, в частности, программного комплекса QForm.
2. Сложность описания и подбора параметров математических моделей вязкой жидкости, применяемых для моделирования процессов тиксоформования, а так же неточности при их использовании позволяют говорить о целесообразности описания реологических свойств твёрдожидкого материала без использования математических зависимостей. В работе доказана возможность создание реологических моделей, которые учитывают

свойства твёрдожидкого деформирования, на основе экспериментальных данных.

3. Полученная на основе экспериментальных данных реологическая модель позволяет проводить моделирование процессов тиксоштамповки алюминиевого сплава А357 в программном комплексе QForm в том числе с учетом перехода части деформируемого металла в твёрдое состояние.
4. Экспериментальные исследования процесса осадки цилиндрических алюминиевых образцов в твёрдожидком состоянии показали отсутствие бочкообразной формы деформированных образцов и высокую чувствительность геометрии деформированных образцов к изменению скорости деформации.
5. Анализ результатов моделирования процесса свободной осадки и сопоставление его с результатами экспериментов показал, что при моделировании процессов тиксоштамповки с использованием полученной реологической модели, в случае отсутствия значительного подсыхания металла по ходу деформирования, целесообразно задавать трение на контактных поверхностях нулевой величиной.
6. Проведенный сравнительный анализ результатов моделирования тиксоштамповки в программном комплексе QForm с использованием полученных реологических моделей с аналогичным моделированием в программном комплексе Flow3D, работающем на основе математической модели вязкой жидкости, и с результатами реальных физических экспериментов показал, что QForm более адекватно отражает процесс течения твёрдожидкой заготовки в полости штампа. В частности, моделирование процессов тиксоформования в программных комплексах, работающих на основе реологической модели вязкой жидкости, не позволяют отображать возможные дефекты в поковке в виде зажимов. Моделирование в программном комплексе QForm с использованием полученной реологической модели позволяет отобразить формирование подобного рода дефектов
7. Результаты работы были использованы при совершенствовании технологического процесса тиксоштамповки заготовок поршней компрессора и разработки технологической линии (патент РФ № 2481171) для получения изделий из цилиндрических реозаготовок в ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ».

Основное содержание диссертации отражено в публикациях

1. Койдан И.М., Евсюков С.А. Исследование возможности моделирования процесса тиксоштамповки в программном комплексе QForm // Технология лёгких сплавов. 2013. №3. С. 104-107. (0,25 п.л.)
2. Бочаров Ю.А., Койдан И.М. Взаимное влияние температуры нагрева заготовки и скорости деформирования в тиксотехнологиях // Известия ВУЗов. Сер. Машиностроение. 2012. №10. С. 69-74. (0,28 п.л.)

3. Койдан И.М. Регулирование скорости деформирования в тиксоштамповке // Известия ВУЗов. Сер. Машиностроение. 2012. №4. С. 67-71. (0,31 п.л.)
4. Разработка системы числового программного управления гидравлическим прессом ПД476 (силой 1600 кН) для тиксоштамповки / И.М. Койдан [и др.]: [Электронный ресурс] // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2009, №9. (<http://technomag.edu.ru/doc/132150.html>). (0,56 п.л.)
5. Бочаров Ю.А., Койдан И.М. Перспективы создания специализированного оборудования для штамповки металла в твёрдожидком состоянии (тиксоштамповка) // Цветная металлургия. 2010. №11. С. 43-48. (0,38 п.л.)
6. Койдан И.М. Проведение модельных экспериментальных исследований процесса тиксоштамповки // Научный семинар стипендиатов программ «Михаил Ломоносов II» и «Иммануил Кант II» 2011/2012 года: сб. материалов. Deutscher Akademischer Austausch Dienst, 2012. С. 76-79. (0,25 п.л.)
7. Койдан И.М. Стратегии и цели системы адаптивного программного управления технологическим процессом штамповки металла в твёрдожидком состоянии // Студенческая весна 2012: Машиностроительные технологии: сб. статей Пятой всероссийской научно-технической конференции студентов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. С. 196-201. (0,38 п.л.)
8. Койдан И.М. Разработка системы числового программного управления гидроколенным прессом для тиксоштамповки // Студенческая весна 2010: Машиностроительные технологии: сб. тезисов Третьей всероссийской студенческой научно-технической конференции студентов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 121-122. (0,13 п.л.)
9. Койдан И.М. Гидромеханический пресс для тиксоштамповки с адаптивной системой числового программного управления // Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации 2010: сб. тезисов Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. С. 83. (0,06 п.л.)
10. Койдан И.М. Параметры управления технологическим процессом тиксоштамповки металла в твёрдожидком состоянии // Будущее машиностроения России: сб. тезисов Четвёртой всероссийской конференции молодых учёных и специалистов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. С. 99-100 (0,13 п.л.)
11. Пат. 2481171 Российская Федерация, МПК В 21 J 5/06, В 21 J 13/08, В 22 D 18/02. Линия штамповки изделий из цилиндрических резаготовок/ Пасечник Н.В., Сивак Б.А., Белоусов И.Я., Виноградов В.А., Сапрыкин А.А., Финогеев О.А., Журавлёв А.С., Койдан И.М.; заявитель и патентообладатель ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ».- N 2011145653/02; заявл. 10.11.2011; опубл. 10.05.2013., Бюл. №13.-10 с. (0,63 п.л.)