

НГО ТХАНЬ БИНЬ

**ТИКСОФОРМИНГ ФАСОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ И
ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Cyrillic letters, likely the author's name.

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

Научный
руководитель:

Семенов Борис Иванович
доктор технических наук, профессор
кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции»,
ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Официальные
оппоненты:

Конкевич Валентин Юрьевич
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
ОАО «ВИЛС»

Бутрим Виктор Николаевич
кандидат технических наук,
Директор «Института новых металлургических технологий»
ОАО «Композит»

Ведущая
организация:

Национальный институт авиационных технологий
ОАО НИАТ

Защита состоится « **30** » **06** 2015 г. в **14** ч. **30** мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.141.04 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просьба
направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана
и на сайте www.bmstu.ru

Автореферат разослан « » 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Семенов В. И.

Актуальность исследования. Тиксоформирование (SSP – Semi Solid Processing, SSM – Semi Solid Metal) – представляет собой цепь последовательных процессов (три стадии, требующие специализированного оборудования), в которой придание металлу требуемой формы изделия осуществляют за одну операцию и только на заключительном этапе при твердожидком состоянии материала. Чтобы это оказалось возможным, к началу формообразования сплав должен представлять собой двухфазную среду - дисперсоид, состоящий из определенного количества сферических частиц твердого металла со средним размером менее 0,1 мм, плавающих в жидкости. В таком суспензированном состоянии при высокой доле твердой фазы металл структурируется и приобретает тиксотропные свойства: на внешнее воздействие он начинает реагировать, как твердое тело (существует предел текучести), но если суспензию длительно подвергать сдвигу, то при определенном уровне напряжений деформируемый материал перестраивается (релаксирует), вязкость среды снижается и металл начинает течь, как жидкость; однако если такому металлу позволить где-либо остановиться, его структура может вновь перестроиться, а вязкость повысится. На эффекте, называемом эффектом тиксотропии, не известном ранее у металлов, и создаваемом специальными средствами в тиксозаготовке, строятся новые технологии: тиксолитье, тиксопрессование, тиксоштамповка и т.п. Наряду с положительным эффектом возникло и ограничение – рабочее окно процесса. Под термином «рабочее окно» обычно понимается температурный интервал, наиболее благоприятный для использования эффекта тиксотропии при формообразовании. Тиксоформинг легко осуществить, если его можно начать при 40 % и завершить при 60 % твердой фазы, а интервал температур ΔT_{40-60} превышает 10 °С. Считается, что при теплообмене, сопровождаемом ростом доли твердой фазы, в движущейся дисперсии твердые частицы остаются недеформируемыми.

Главная особенность таких технологий – возможность осуществлять сложное формообразование за одну операцию при пониженном, за счет низкой доли жидкой фазы, удельном энергосодержании металла. Новые схемы организации технологических процессов в заготовительных производствах привлекают высоким качеством и повышенной надежностью заготовок деталей, существенно измененными на пользу конструктора критериями технологичности проектируемых деталей, многократно возрастающей пластичностью сплава в изделии без потери в прочности. В результате их использования конфигурация заготовки более соответствует чертежу детали, в несколько раз ниже потери металла на механическую обработку, количество операций при формообразовании сокращается до одной, снижаются многократно затраты энергии на изготовление детали. Эффективность технологий тиксоформирования проявляется и в уменьшении толщины стенок изделия при одновременном повышении их герметичности, в одновременном росте пределов текучести и прочности, пластичности и ударной вязкости материала, приводящих к снижению массы детали. Высокое качество заготовки достигается при незначительном возрастании себестоимости производства. Для многих литейных сплавов названные технологии за рубежом коммерциализованы.

В отличие от литейных, для высокопрочных алюминиевых сплавов, где одновременно приходится решать две принципиально разные задачи, -

формирование оптимальной микроструктуры тиксозаготовки (микроуровень) и формирование оптимальной структуры выделений (наноуровень), что традиционно требует деформирования твердой фазы, - тиксоформинг продвигается трудно. В стандартизованный ряд сплавов, рекомендованных для переработки в твердожидком состоянии (стандарт NADCA, США, 2006; в России аналогичных стандартов нет), включены только литейные силумины. Однако в названном стандарте в ряду рекомендованных сплавов, ранжированном по содержанию кремния ($1,0 \leq \text{Si}$, вес.% $\leq 18,0$), существует пробел: сплавы, содержащие 11-13 вес.% Si, т.е. сплавы эвтектических составов, такие, например, как американский сплав 336.0, российские сплавы АЛ25, АЛ30 и другие поршневые силумины, широко используемые в двигателестроении для изготовления поршней, не включены в список сплавов, рекомендуемых для тиксоформинга, так как у около эвтектических сплавов не выполняется условие $\Delta T_{40-60} > 10^\circ\text{C}$.

Поршневые силумины обладают высокой жаропрочностью, но отличаются низкой пластичностью. Повышение пластичности поршневых сплавов, подвергнутых тиксоформингу, при сохранении прочностных характеристик ведет к повышению качества поршней и к повышенной надежности двигателей внутреннего сгорания, что делает выбираемое направление исследований, - тиксоформинг фасонных деталей из эвтектических и деформируемых алюминиевых сплавов, - **актуальной практической и важной научной проблемой.**

Целью диссертационной работы является разработка тиксотехнологии получения высококачественных фасонных деталей из эвтектических и деформируемых алюминиевых сплавов с проявлением эффектов псевдопластичности и тиксотропии на основе метода обратного выдавливания.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

- Разработать способ получения из эвтектического (АЛ25) и деформируемых (АК4-1, 1973, В95 и В96Ц3) алюминиевых сплавов порционной заготовки с тиксоструктурой и комплексом параметров (структурные, реологические, кристаллизационные), отвечающем требованиям тиксоформинга;

- Исследовать эволюцию структуры и механических характеристик исходных тиксозаготовок на всех стадиях тиксоформинга;

- Изучить возможность и определить условия, приводящие к деформированию твердых сферических частиц в твердожидком металле исследуемых составов в интервале температур, соответствующих рабочему окну 3-ей стадии тиксоформинга;

- Изучить процесс формообразования фасонной детали «поршень» нескольких типоразмеров из эвтектического алюминиевого сплава АЛ25 методом обратного выдавливания в твердожидком состоянии;

- Исследовать структуру и механические характеристики тиксопрессованной детали в «сыром» и термообработанном состоянии.

Объектами исследования являются тиксопрессованные заготовки детали поршень нескольких типоразмеров, получаемые прессованием в твердожидком состоянии из сплавов, считающихся непригодными для переработки в твердожидком состоянии.

Предметами исследования являются процессы получения, структура и свойства тиксозаготовок (1-я стадия), эволюция структуры и свойств металла при

повторном нагреве и расплавлении (2-я стадия), формообразование, структура и свойства модельных заготовок поршней (3-я стадия) из промышленных эвтектического АЛ25 и деформируемых (АК4-1, 1973, В95 и В96ЦЗ) сплавов.

Теоретическая и методологическая основа исследования. Основу диссертационного исследования составили труды зарубежных и российских ученых в области материаловедения и реологии твердожидких сплавов, моделирования течения сплавов в твердожидком состоянии, их переработке с использованием синергетического эффекта от комбинированного действия теплового и сдвиговой деформации – с использованием эффекта тиксотропии.

В ходе работы над диссертацией были изучены фундаментальные работы зарубежных исследователей по промышленному использованию твердожидких металлов (Flemings M.C., Atkinson H. V., Kapranos P., Kirkwood D. H., Kumar P., Modigell M. и многие другие), публикации российских учёных и специалистов в области переработки сплавов в твердожидком состоянии (Семенов Б.И., Эскин Г.И., Бочаров Ю.А., Артеc А.Э., Белоусов И.Я., Куштаров К.М., Коробова Н.В., Дмитриев А.М., Хижнякова Л.В., Койдан И.М...), опубликованные в периодической печати и трудах международных конференций.

Научная новизна.

1. Показано, что определение количества твердой фазы в суспензии, построенное на учете реального состава многокомпонентного сплава и использовании термограмм (дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и кривой охлаждения) позволяет управлять долей твердой фазы при осуществлении 1-й и 3-й стадий тиксоформинга при работе со сплавами, отнесенными к узкоинтервальным ($\Delta T < 70^\circ\text{C}$).

2. Показано, что из высокопрочных деформируемых алюминиевых сплавов с интервалом затвердевания $162-166^\circ\text{C}$, заметно превышающем предельную допускаемую величину 130°C , при искусственном прерывании роста кристаллов твердого раствора закалкой суспензии в тонкостенном стакане, формируются тиксозаготовки, пригодные для последующей переработки.

3. Предложенная методика позволяет расширить список алюминиевых сплавов, рекомендуемых для переработки в твердожидком состоянии, включив в него легированные промышленные сплавы эвтектического состава.

4. Установлены режимы переработки тиксопрессованием названных или близких по составу сплавов, вызывающие пластическую и сверхпластическую деформацию зерен твердой фазы в дисперсии. Сверхпластическая деформация зерен твердой фазы со средним размером $60-90\text{ мкм}$ – новый физический эффект, ранее не известный в процессах прессования. Условия ее проявления определены впервые, их новизна защищена патентом.

Практическая ценность работы заключается в том, что на основе ее результатов представляется возможным:

– Рекомендовать для промышленного освоения технологию переработки сплава АЛ25 в твердожидком состоянии, которая позволяет при соответствующей подготовке суспензии получать высококачественные, близкие по размерам к детали заготовки поршней со свойствами, значительно превышающими характеристики сплава того же состава, достигаемые в других способах формообразования;

– Использовать совместно ДСК кривые и кривые охлаждения для выбора рабочего окна изготовления тиксозаготовок и окна последующих стадий

тиксотропности. Предложенная методика контроля за тепловыделением позволила впервые в мировой практике изготовить порционные цилиндрические и кольцевые тиксозаготовки из узкоинтервального эвтектического (АЛ25) и широкоинтервальных деформируемых (АК4-1, В95 и В96ЦЗ) сплавов;

- Рекомендовать использование охлаждаемого желоба при разработке способа получения тиксозаготовок из других деформируемых и литейных алюминиевых сплавов;

- Предложить промышленный способ изготовления высококачественных поршневых изделий из других эвтектических сплавов в твердотвердом состоянии;

- Рекомендовать использование упрочняющей термической обработки по режиму Т6 для поршневых изделий из сплава АЛ25, прошедших тиксоформинг, для любых условий эксплуатации.

Достоверность результатов подтверждается использованием современных методов исследования, включающих вычислительные эксперименты с применением программного комплекса Flow-3D и физические эксперименты, выполненные в ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ» с привлечением современных экспериментальных средств, качественным и количественным согласованием результатов физических и вычислительных экспериментов, использованием статистических методов обработки результатов измерений, согласованностью полученных результатов с литературными данными. Влияние режимов деформации и термообработки на формирование микроструктуры и свойств сплавов в изделии исследовали после тиксопрессования на гидравлическом прессе ДБ2436. Теплофизические, механические свойства сплавов и структурные факторы тиксозаготовок определяли по стандартным методикам на современном оборудовании: калориметре DSC 204 F1, испытательной машине UTC 101, твердомере DuraScan 20, растровом электронном микроскопе FEI Phenom ProX, оптических микроскопах Neophot 21, Optika B1000 MET, Olympus SZX7. Химический состав сплавов определяли на спектрометре Q4 MOBILE.

Внедрение. Основные результаты диссертационной работы использованы при выполнении Государственного контракта № 12411.1370300.05.007 от 22.02.2012, шифр «Поршень – ПДД» (ОАО АХК ВНИИМЕТМАШ), и в учебном процессе на кафедрах «Литейные технологии» и «Ракетно-космические композитные конструкции» ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э.Баумана, что подтверждено соответствующими актами.

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах и выставках:

- III-я, IV-ая, VII-ая молодежные научно-инженерные выставки «Политехника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия (Москва, 2008, 2009, 2012);

- Международный молодежный форум и V-ая выставка «Политехника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия (Москва, 2010);

- Научные конференции аспирантов кафедры ракетно-космические композитные конструкции МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2012 – 2015);

- 2nd International Conference on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications, United Kingdom (Wrexham, 2012);

- Круглый стол на тему: «Новые материалы и технологии в ракетно-космической технике», ОАО «Композит», МО, Россия (Королёв, 2012);

- IV-ая международная научная конференция: «Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы», Россия (Москва, 2013);
- V-ая международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», ИМЕТ РАН, Россия (Москва, 2013);
- Конкурс «Молодые ученые» в рамках XIX-й Международной промышленной выставки «Металл-Экспо», Россия (Москва, 2013);
- VII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия (Москва, 2014);
- XX Юбилейная международная промышленная выставка «Металл-Экспо», Россия (Москва, 2014).

Публикации. По теме диссертации опубликовано: 1 патент на изобретение, 14 научных работ общим объемом 7,38 п.л., из них в журналах из списка ВАК РФ – 6.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, общих выводов, списка литературы из 113 наименований, изложена на 187 страницах машинописного текста, содержит 160 рисунков, 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении излагается обоснование выбора и актуальности темы диссертационной работы, раскрывается ее научная новизна и практическая ценность, формулируется цель работы.

В первой главе «Литературный обзор» рассмотрены методы подготовки сплавов к тиксоформингу, изучена эволюция микроструктуры во время подготовки материала и в процессе формообразования, влияние тепло- и массообмена между двумя фазами и морфологии растущей фазы на вязкость суспензии, изучено механическое поведение дисперсных текучих систем при относительно низких (реотехнологии) и высоких (тиксотехнологии) изменяющихся долях твердой фазы, проанализированы опубликованные результаты физического и компьютерного моделирования при использовании различных схем прессования поршневого изделия, дано обоснование выбора схемы прессования для данной работы.

Во второй главе «Технологический процесс получения тиксозаготовок из алюминиевых эвтектического и деформируемых сплавов» описываются материалы, методики исследований, представлен техпроцесс получения тиксозаготовок; при этом использован опыт, накопленный в МГТУ им. Н.Э. Баумана. В основу технического решения положен принцип разделения в пространстве и времени процессов зарождения и роста кристаллов твердой фазы. Техническое решение связано с использованием слабого перегрева жидкого металла, организация зародышеобразования в условиях, далеких от равновесия, выбор специальной формы для подготовки суспензии в условиях медленной объемной кристаллизации, быстрое охлаждение подготовленной суспензии.

Для исследования в данной работе были выбраны следующие алюминиевые сплавы: АЛ25, АК4-1, 1973, В95 и В96ЦЗ. Сплавы принципиально отличаются друг от друга количеством кремния в растворе, содержание которого стало определяющим фактором управления долями фаз при прессовании. Фактические химические составы литейного АЛ25 и деформируемых АК4-1, 1973, В95 и В96ЦЗ алюминиевых сплавов приведены в Таблице 1. Там же для сравнения представлен состав хорошо изученного сплава АК7, использованного для аналогичных целей.

Сплавы АЛ25, АК4-1, легированные медью, магнием и никелем, относятся к жаропрочным алюминиевым сплавам и широко используются в российском двигателестроении в качестве поршневых сплавов. Поршни из сплава АЛ25 изготавливаются методами литья, из сплава АК4-1 – горячей объемной штамповкой. Сплавы 1973, В95 и В96ЦЗ – легированные высокопрочные сплавы конструкционного назначения. Аналоги этих сплавов широко исследуются за рубежом с целью переработки методами тиксоформинга.

Таблица 1.

Химические составы сплавов (% вес.), выбранных для исследования

Сплав	Fe	Si	Mn	Ni	Ti	Cu	Cr	Pb	Mg	Zn	Sn	Zr	Al
АК7	0,31	6,57	0,04	0,02	0,02	0,08	-	0,02	0,4	0,02	-	-	ост.
АЛ25	0,47	13,1-13,5	0,25	0,9	0,04	2,1-2,2	0,06	0,02	0,9	0,6	0,006	-	ост.
АК4-1	0,8-1,3	< 0,35	< 0,2	0,8-1,3	0,02-0,1	1,9-2,5	-	-	1,4-1,8	< 0,3	-	-	ост.
1973	0,1	0,04	0,03	-	-	1,65	0,03	-	2,4	5,5	-	0,1	ост.
В95	0,98	0,17	0,19	0,1	0,05	1,7	0,17	-	2,1	6,1	-	-	ост.
В96ЦЗ	0,14	0,04	0,006	-	0,03	1,79	0,003	-	1,95	8,3	-	0,13	ост.

Техническая реализация схемы получения тиксозаготовок в МГТУ им. Н.Э. Баумана состоит в том, что металл, заливаемый с заданным перегревом, с контролируемой скоростью транспортируется по короткому охлаждаемому наклонному желобу (Рис. 1), образуя на нем тонкую твердую корочку. Процесс реализован на кафедре «Литейные технологии» с участием к.т.н., доцента Семенова А.Б.

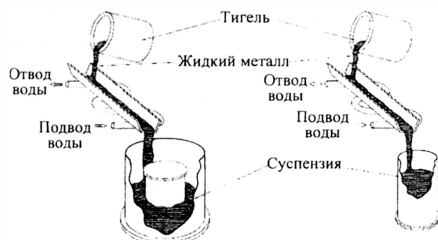


Рис. 1. Заливка металла по водоохлаждаемому желобу

Для формирования тиксозаготовки с требуемым качеством структуры металла суспензируемый сплав должен содержать примерно 700 зародышей/мм³. Для реализации этого условия необходимо использовать раздельное (многоуровневое) управление зарождением и ростом кристаллов первичной фазы. В используемой схеме реализовано двухуровневое управление. Первым уровнем управления является контролируемое быстрое охлаждение сплава с намораживанием на водоохлаждаемой поверхности металлического желоба твердой корочки исследуемого металла, имеющей дендритное строение с малым дендритным параметром. Ломая и оплавляя кончики дендритов движущимся слабо перегретым металлом можно обеспечить получение струи жидкого металла с необходимым количеством жизнеспособных зародышей, равномерно распределенных в единице объема жидкого металла при температуре, близкой к ликвидусу. Второй уровень управления заключается в контролируемом медленном охлаждении суспензии, залитой в стакан, где обеспечиваются условия роста твердой фазы, необходимые для сохранения глобулярной формы растущих зерен. Контроль температуры металла осуществляется с помощью термпар.

Полученное состояние суспензии фиксируется закалкой в воду, для чего полученную заготовку помещают в резервуар с водой вместе со стаканом. Отделённая от стакана болванка разделяется на мерные заготовки, из которых в дальнейшем производят фасонные изделия методом тиксопрессования.

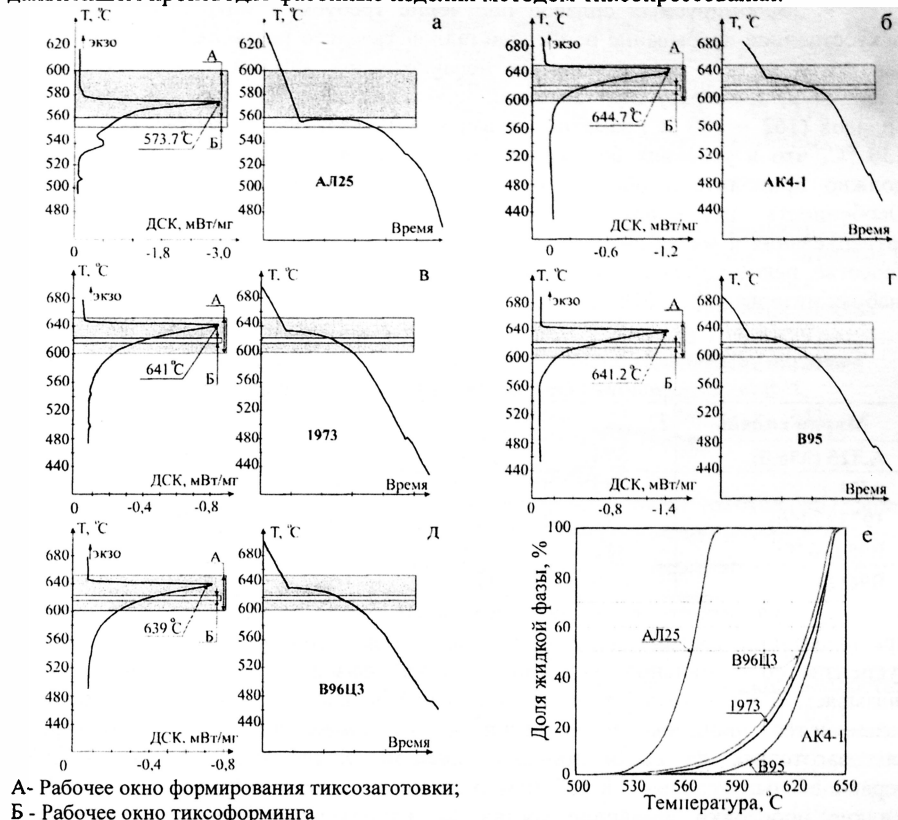


Рис. 2. Кривые ДСК, кривые охлаждения (а - д) и доля жидкой фазы (е) в зависимости от температуры эвтектического (АЛ25) и деформируемых (АК4-1, 1973, В95, В96Ц3) сплавов

Начинать изготовление тиксозаготовок можно только всесторонне изучив информацию о протекании фазового перехода в используемом сплаве. Только совместный анализ двух представленных зависимостей (см. Рис. 2) позволил нам назначить рабочее окно получения тиксозаготовки (выделено розовым цветом) и начало рабочего окна тиксоформинга (выделено желтым цветом). Рис. 2 а-д показывают, насколько эта информация индивидуальна, и насколько она, при внешней похожести кривых, различна у литейного и деформируемых сплавов. У первого рабочее окно формирования тиксозаготовки заканчивается около критической для темпа кристаллизации температуры сплава, связанной с естественным прекращением роста кристаллов твердого раствора и началом выделения равновесной эвтектики, что приводит к расширению интервала затвердевания сплава и его температурной чувствительности до рекомендуемых

значений. Это дает основание полагать, что легирование сплава АЛ25 медью, магнием и никелем переводит эвтектический по Si сплав в группу сплавов, пригодных для тиксоформинга в рекомендуемом рабочем окне процесса.

У деформируемых сплавов получение требуемой микроструктуры – это искусственное прерывание роста кристаллов твердого раствора, приводящее при закалке в воду к кристаллизации неравновесной эвтектики. Как показано в Таблице 2, температурный интервал кристаллизации ΔT всех деформируемых сплавов (162 – 166 °С) заметно превышает предельную допускаемую величину 130 °С, что в условиях объемного затвердевания гранулированных кристаллов должно приводить к образованию щелевой пористости по границам гранул. Особенность изучаемых высокопрочных сплавов – большие интервалы затвердевания и малая доля жидкой фазы на последней стадии затвердевания. В качестве рекомендуемых температур начала прессования для данных сплавов выбран интервал 625 – 618 °С.

Таблица 2.

Температуры фазного превращения, интервал затвердевания и выбираемые условия формирования тиксозаготовок

Марка сплава	$T_{\text{ликвидуса}}$ °С	$T_{\text{солидуса}}$ °С	ΔT , °С	$T_{\text{заливки}}$ °С	$T_{\text{закалки}}$ °С
АЛ25 (336.0)	574	505	69	620	560
АК4-1	645	480	165	660	605
1973 (7050)	641	477	166	650	600
В95 (7075)	642	477	165	650	600
В96Ц3	640	478	162	650	600

В результате при повторном нагреве (II стадия процесса тиксоформинга) в правильно подготовленном литейном сплаве может формироваться металлическая суспензия со стабильной по составу жидкой фазой, в которой при выдержке (называемой в реологии отдыхом суспензии) по классическим закономерностям развиваются процессы агломерации и деагломерации твердых частиц. В тиксозаготовках из высокопрочных сплавов, закристаллизованных в очень неравновесных условиях, в рабочем окне тиксоформинга будут формироваться жидкие прослойки, имеющие состав, не находящийся в термодинамическом равновесии с твердой фазой. Реологические свойства подобных суспензий не изучены, а критерию темпа изменения доли при 50% твердой фазы $df_s / dT < 0,015$ соответствуют только сплавы, имеющие большую долю равновесной эвтектики. По-видимому, по этой причине большинство работ по тиксоформингу деформируемых сплавов (не отвечающих этому критерию) до настоящего времени находятся в мировой практике на стадии исследований, а не коммерциализации. Тем не менее, совместный анализ двух зависимостей позволил установить температуры фазовых превращений, выбрать наиболее благоприятные условия формирования заготовок и назначить режимы их переработки. Полученные данные представлены в Таблице 2. Доля жидкой фазы алюминиевых сплавов в зависимости от температуры металла, вычисленная по результатам ДСК анализа, представлена на Рис. 2 е.

Используемую технологическую цепочку можно отнести к схемам теплового разрушения дендритов, образующих твердую корочку на водоохлаждаемом желобе и там же размываемых потоком слегка перегретого металла. Частично расплавляя осколки дендритов, поток переносит готовые

зародыши высокого качества в тонкостенный стакан, где организуется их согласованное кооперативное движение, а медленный отвод тепла от стакана способствует объемному затвердеванию и формированию суспензии с глобулярными частицами твердой фазы. Вся необходимая информация о структуре материала в момент завершения первой (Рис. 3 а, в - е) или второй (Рис. 3 б) стадий процесса может быть получена современными компьютерными методами анализа изображений. Различные типы порционных тиксозаготовок, изготовленных из сплава В95, представлены на Рис. 4. Параметры микроструктуры и микротвердость алюминиевых сплавов различных типов заготовки представлены в Таблице 3.

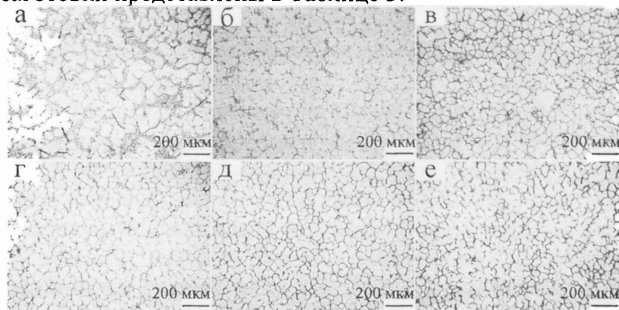


Рис.3. Микроструктуры фидстоков из литейных и деформируемых алюминиевых сплавов: а) АК7; б) АЛ25 после повторного нагрева и закалки; в) В95; г) В96Ц3; д) 1973; е) АК4-1

Для прессования больших модельных поршней были изготовлены серии цилиндрических тиксозаготовок Ø96 мм, Н300 мм (масса ~ 6 кг) из сплавов АЛ25, АК4-1 и В96Ц3. На Рис. 5 представлены цилиндрические тиксозаготовки Ø96 мм, изготовленные из сплавов АЛ25 и В96Ц3.

Таблица 3.

Параметры микроструктуры в заготовках из изучаемых сплавов

Сплав	Диаметр заготовки, мм	Средний экв. диаметр, мкм	Фактор формы	Микротвердость, HV0.01
АЛ25	Ø65	60,2	0,82	72
АК4-1	Ø80	86,2	0,81	85
1973	Ø80	79,6	0,85	119
В95	Ø65	72,7	0,85	118
В96Ц3	Ø65	73,1	0,84	120

Макроструктура тиксозаготовки Ø65 мм из сплава АЛ25 до- и после повторного нагрева представлена на Рис. 6 а, б. Микроструктуры после повторного нагрева в защитной атмосфере аргона представлены на Рис. 6 в, г.

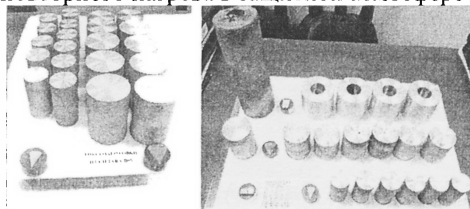


Рис. 4. Различные типы порционных тиксозаготовок, изготовленных из сплава В95

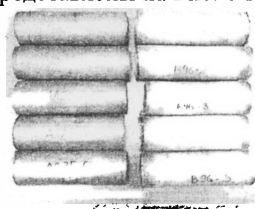


Рис. 5. Тиксозаготовки, изготовленные из сплавов АЛ25 и В96Ц3

Устройства «водоохлаждаемого желоба» подобного типа пригодны для получения заготовок массой до 6 кг. Использование одного желоба затрудняет

применение устройства для получения тиксозаготовок массой до 30 кг; подана заявка на патент на «Способ и устройство для изготовления тиксозаготовок» массой до 30 кг (№ 2014146234 от 18.11.2014).

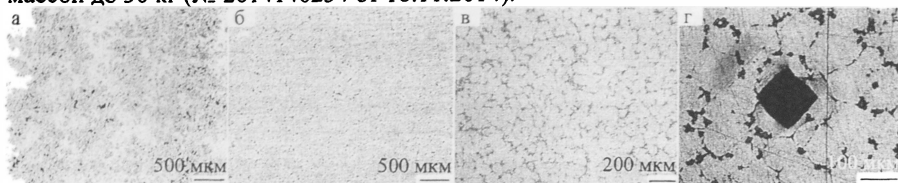


Рис. 6. Структура тиксозаготовки $\varnothing 65$ мм из сплава AL25 до- а) и после повторного нагрева б, в и г)

В третьей главе «Тиксопрессование модельных поршней из эвтектического литейного и деформируемых алюминиевых сплавов» представлены результаты изучения тиксопрессуемости сплавов и тиксопрессования модельных поршней.

Главным недостатком прямого прессования твердой заготовки является существование трения между металлом и контейнером, что требует большего усилия для прессования и не позволяет получить точную реологическую характеристику сплава. При исследовании прямого прессования твердожидкого металла было установлено, что при продавливании тиксозаготовок и из литейных, и из деформируемых сплавов через гладкую матрицу с клиновидной рабочей зоной при скорости деформации $(0,5...5) \text{ с}^{-1}$, коэффициенте вытяжки $\lambda=17...36$ и температуре контейнера в интервале $300-500^\circ\text{C}$ в очаге деформации возможно не только преобразование твердых сферических частиц в волокно, предпочтительно начинающееся у стенок контейнера: у высокопрочных сплавов типа В95 до выхода из фильеры при сохранении текстуры начинается распад волокон на очень мелкие индивидуальные зерна, сопровождаемый увеличением твердости сплава В95 в прессостатке, в среднем, на 15-20 %. Это обстоятельство послужило одним из основных мотивов при выборе схемы прессования поршня.

Практическая проверка тиксоформуемости заготовок из исследуемых сплавов осуществлялась в отделе прессовых машин ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ» им. академика А.И. Целикова на модельной детали «поршень» трех типоразмеров при участии к.т.н. Белоусова И.Я., к.т.н. Койдана И.М. и к.т.н. Первушина В.В. с использованием имеющегося прессового оборудования по схеме, показанной на Рис. 7.

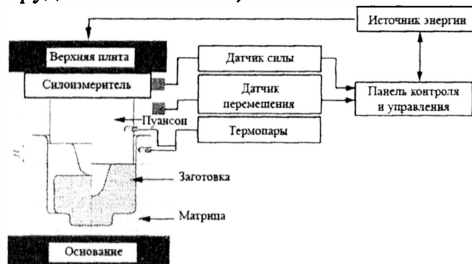


Рис.7. Схема экспериментальной установки для обратного прессования

Для проведения физического эксперимента были выбраны 3 типа оснастки для тиксопрессования из цилиндрических заготовок (масса 0,8 (для поршня

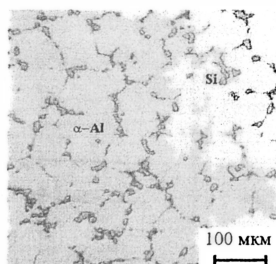


Рис. 8. Микроструктура тиксозаготовки сплава AL25 перед прессованием

ДРЦ-85), 1,3 и 5,5 кг (для поршня КАМАЗ 7405)) сплава АЛ25. Опытные модельные поковки изготовлены из всех представленных тиксозаготовок, включая деформируемые сплавы.

Предварительные исследования показали, что суспензия сплава АЛ25, приготовленная из тиксозаготовки повторным расплавлением, даже вблизи солидуса сохраняет уникальную вязкопластичность и обладает размягчающимся при сдвиге тиксотропным поведением твердожидкого материала, в некоторых условиях приводящих к сверхпластичности кристаллов α -твердого раствора и к резкому измельчению фаз, кристаллизующихся последними.

Микроструктура тиксозаготовки из сплава АЛ25, формирующаяся после длительного повторного нагрева (50 мин.) в защитной атмосфере аргона до выбранной температуры начала тиксопрессования (560-555 °С) с последующей закалкой в воду, показана на Рис. 8. Очевидно, что заготовка обладает всеми необходимыми для тиксопрессования качествами структуры, размер и распределение кристаллов Si перед началом деформирующей обработки оптимальны. Таким образом, предложенное нами правило выбора условий осуществления тиксолитья заготовок позволяет формировать высококачественные фасонные заготовки из эвтектического сплава АЛ25 в твердожидком на стадии формообразования состоянии, при котором мелкие дисперсные кристаллы первичного кремния равномерно распределены по границам глобулярной α -Al твердой фазы, позволяя обеспечить требуемую тиксоформуемость сплава.

Таблица 4.

Температуры нагрева тиксозаготовок перед прессованием

Марка сплава	Рекомендованный температурный интервал начала деформирования, °С	Выбранные температуры тиксозаготовки перед извлечением из капсулы, °С
АЛ25	560 – 555	560 ± 2
АК4-1	625 – 618	620 ± 3
1973	625 – 618	616 ± 3
В95	625 – 618	616 ± 3
В96ЦЗ	625 – 618	616 ± 3

Ранее по результатам анализа калориметрических кривых и кривых охлаждения был выбран диапазон температур, наиболее благоприятный по мнению автора для проведения операции формообразования. На стадии повторного нагрева при отработке операции обратного прессования экспериментально определялась температура тиксозаготовок, нагретых до «требуемого» твердожидкого состояния, соответствующего легкому внедрению индентора. Фактические температуры тиксозаготовок, использованные при прессовании, и интервалы температур начала прессования, рекомендованные по определенному соотношению долей твердой и жидкой фаз, представлены в Таблице 4.

Требуемая консистенция твердожидкой тиксозаготовки и соответствующие этому состоянию температуры, представленные в Таблице 4, определялись по следующим признакам:

- достаточно свободное внедрение в тиксозаготовку острого металлического стержня (щуп) при неизменной форме заготовки;

- начало самопроизвольного формоизменения тиксозаготовки в виде оседания ее нижней части и образования «слоновой ноги», что соответствует предельному содержанию жидкой фазы в суспензии, при котором заготовка с равномерным распределением первичных кристаллов в жидкой фазе начинает терять геометрическую форму твердого тела (пластически деформироваться) под статическим воздействием поля тяжести.

Как следует из результатов измерений, сохранить устойчивую геометрию суспензированных тиксозаготовок в рекомендованном температурном интервале тиксоформинга удалось только у жаропрочных сплавов АЛ25 и АК4-1.

Сохранить устойчивость тиксозаготовок из сплавов 1973, В95 и В96ЦЗ в сконструированной капсуле при температуре выше 616 °С не удалось; по этой причине температуры тиксозаготовок из названных сплавов перед извлечением из капсулы не превышали 616 ± 3 °С.

Повторный нагрев тиксозаготовок проводили в контролируемой муфельной печи сопротивления «ЮТ-210-17» в защитной атмосфере аргона. Для повторного нагрева тиксозаготовок были назначены соответствующие температуры печи: 700 °С для эвтектического сплава АЛ25 и 750 °С для деформируемых сплавов 1973, В95, В96ЦЗ и АК4-1. Скорость нагрева печи 6 °С/мин. Продолжительность нагрева тиксозаготовок в печи до твердожидкого состояния в зависимости от массы и состава сплава изменялась от 50 мин до 2 час.

Для нагрева штамповой оснастки перед прессованием использовали две жидкостные горелки на дизельном топливе GIERSCH R1-V-L. Контроль температуры нагретых заготовок, матрицы и пуансона осуществлялся зачеканенными в них термopарами. Для измерения температуры тиксозаготовки при повторном нагреве использовали 3 термopары, которые были равномерно распределены по высоте тиксозаготовки.

Технологическая смазка наносилась на формообразующие поверхности матрицы и пуансона посредством пульверизатора. В качестве смазки применялся коллоидно-графитовый препарат на водной основе марки ПСВ. Время, отводимое на загрузку заготовки в штамп, составляло около 5 сек. Скорость холостого хода пресса - 40 мм/с. Скорость рабочего хода пресса на 1-ой ступени - 6,0 мм/с, на 2-ой ступени - 0,7 мм/с. Выдержка заготовки под давлением: 105 -110 секунд.

По завершении процесса прессованная деталь быстро извлекалась из штампа и подвергалась закалке в холодной воде. Общий вид и разрезы тиксопрессованных заготовок поршней ДРЦ-85 из сплава АЛ25 показан на Рис. 9. Размерный ряд тиксопрессованных деталей из сплава АЛ25 показан на Рис. 10. Опытные образцы заготовок поршня КАМАЗ 7405 из сплавов АЛ25, В96ЦЗ и АК4-1 представлены на Рис. 11.

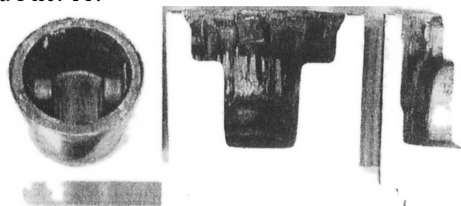


Рис. 9. Общий вид и разрезы тиксопрессованных заготовок поршней ДРЦ-85 из сплава АЛ25

Опираясь на опыт прессования аналогичной модельной детали из сплава АК7, перед прессованием оснастка нагревалась до температуры 330 – 350 °С. При таком конструктивном исполнении и температурном режиме в данной работе

опробована концепция «неизотермического обратного прессования» с использованием всех подготовленных тиксозаготовок.



Рис. 10. Размерный ряд тиксопрессованных деталей из сплава АЛ25



Рис. 11. Опытные образцы заготовок поршня КАМАЗ 7405 из сплавов АЛ25, В96Ц3 и АК4-1

В четвертой главе «Структура и свойства поршней из сплава АЛ25» представлены результаты исследований макро- и микроструктур тиксопрессованных деталей из сплава АЛ25; изучены механические свойства и разрушение тиксопрессованного сплава АЛ25 в заготовке детали поршень ДРЦ-85; и проведена оценка однородности свойств материала по сечениям тиксопрессованной детали поршень КАМАЗ 7405 из сплава АЛ25.

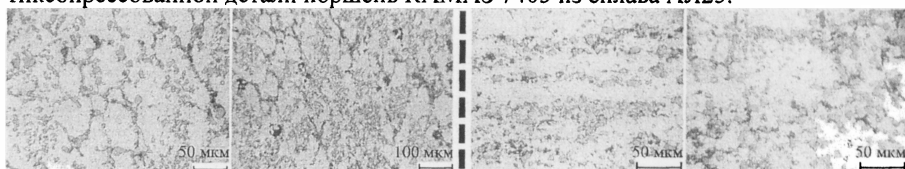


Рис. 12. Микроструктура тиксопрессованной заготовки детали поршень ДРЦ-85 из сплава АЛ25 (до и после ТО)

Микроструктуры тиксопрессованных заготовок в «сыром» и термообработанном состоянии при различных увеличениях представлены на Рис. 12 - 13. Первичные зерна α -алюминиевой фазы принципиально отличаются от структур, получаемых традиционными методами тем, что не имеют дендритного строения. Не обнаруживаются фазы, имеющие игольчатую и скелетную морфологию. Мелкие, близкие к равноосным кристаллы первичной кремниевой фазы и эвтектические включения равномерно распределены вдоль границ зерен α -алюминиевой фазы.

Благодаря дисперсности исходной эвтектики в тиксопрессованных изделиях в сплаве после ТО заметно протекает сфероидизация Si-фазы. Все перечисленные особенности микроструктуры тиксопрессованной детали должны благоприятно отразиться на механических свойствах сплава.

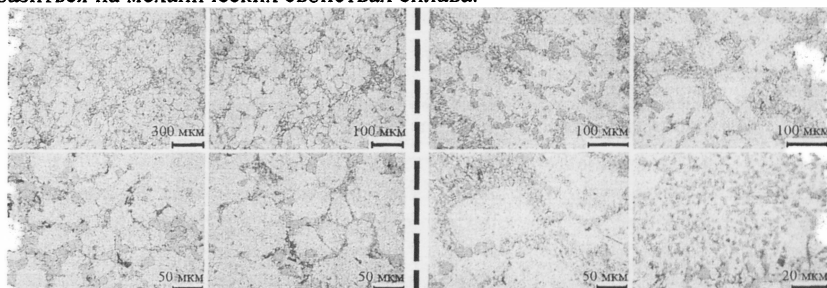


Рис. 13. Микроструктура тиксопрессованной заготовки детали поршень КАМАЗ 7405 из сплава АЛ25 (до и после ТО)

Механические испытания проводились в «лаборатории разрушающих видов испытаний МГУПИ – КАСКАД» на установке УТС 101. Схема вырезки образцов из тиксопрессованной заготовки детали поршень ДРЦ-85 для испытания на растяжение по ГОСТ 1497-84 и места измерения микротвердости показаны на Рис. 14. Кривая деформирования образца № 5 показана на Рис. 15.

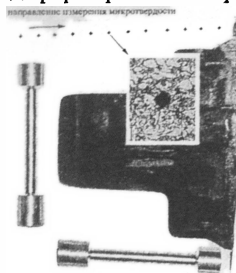


Рис. 14. Схема вырезки и места измерения микротвердости

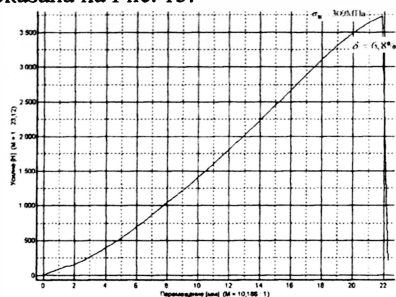


Рис. 15. Кривая деформирования образца № 5

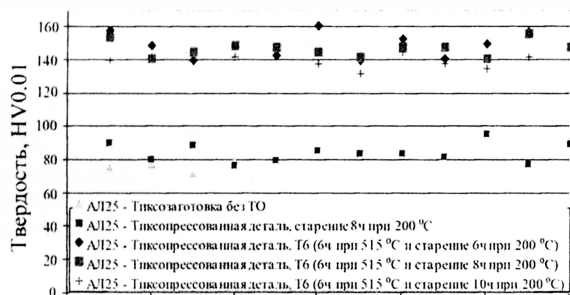


Рис. 16. Твердость по высоте тиксозаготовки и тиксопрессованной детали поршень ДРЦ-85 из сплава АЛ25

Дополнительно на шлифах проводили измерения микротвердости по Виккерсу. Измерения выполнены на автоматическом микротвердомере «DuraScan 20» при нагрузке 10г в течение 10 секунд. Установлено, что микротвердость тиксопрессованной детали после термообработки по режиму Т6 изменяется в интервале 135-163 HV0.01 (Рис. 16).

Таблица 5.

Механические свойства сплава АЛ25 в фасонных заготовках, изготовленных литейными методами (литературные данные) и тиксопрессованием

№ п/п	Технология получения фасонной заготовки	Свойства			
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	НВ
1	Литье в кокиль (ГОСТ 1583-93)	186	-	-	90
2	Литье в кокиль	220	220	0,5	107
3	Жидкая штамповка ($P = 150$ МПа)	250	240	0,85	120
4	Жидкая штамповка, ГИП, Т6	310	290	1,2	121
5	Тиксопрессование, Т6	298 ± 9	277 ± 7	$6,5 \pm 0,4$	135 - 163

Установлено, что твердость сплава АЛ25 в тиксопрессованной детали значительно превышает твердость сплава того же состава, достигаемую в других способах формообразования (см. Таблицу 5), делая тиксопрессование особо перспективным способом промышленного изготовления поршней.

На Рис. 17 - 18 показаны микроструктуры в зоне разрушения и фрактография поверхностей разрушения, где видны пути распространения магистральной трещины после испытания на растяжение в образцах, изготовленных различными методами из сплавов близких составов: зарубежного 336.0 (AlSi13Mg1CuNi - рафинирование, литье в кокиль) и АЛ25. Легко заметить, что тиксопрессование приводит к значительному росту прочности связи по границам α -твердого раствора и эвтектики, способствуя пластической деформации зерен α -твердого раствора вблизи поверхности разрушения и появлению площадки текучести (см. Рис. 15).

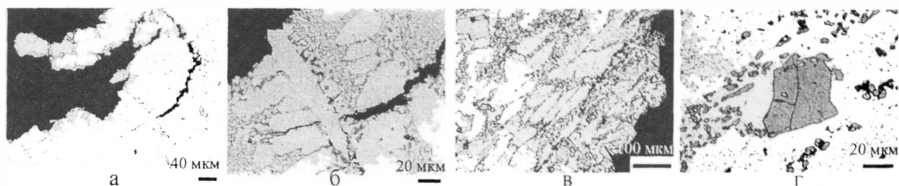


Рис. 17 – Поверхность разрушения образцов из сплавов 336.0 (а, б) и АЛ25 (в, г)

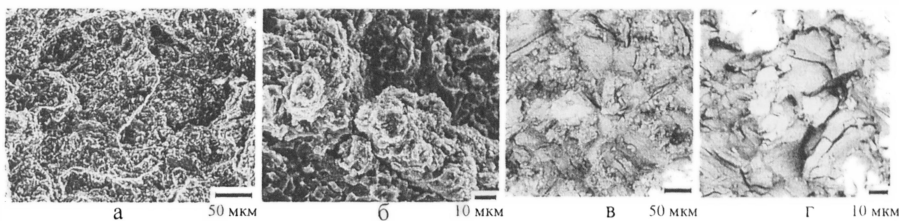


Рис. 18. Фрактография поверхности разрушения образцов из сплавов: 336.0 (а, б) и АЛ25 (в, г)

В заключении кратко сформулированы основные выводы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Определены условия, в которых алюминиевые сплавы, считающиеся «трудными» для тиксоформинга, могут быть использованы для получения порционных тиксозаготовок, пригодных для переработки в твердожидком состоянии. Условия изготовления тиксозаготовок по схеме «водоохлаждаемого желоба»: температура заливки металла в водоохлаждаемый желоб для сплавов АЛ25 – 620 °С, АК4-1 – 660 °С, для 1973, В95 и В96ЦЗ – 650 °С; температура закалки суспензии АЛ25 – 560 °С, АК4-1 – 605 °С, для 1973, В95 и В96ЦЗ -600 °С. С учетом реального состава, например сплава АЛ25, образующего до 7 равновесных эвтектик, реальный интервал затвердевания в неравновесных условиях может приближаться к требуемому минимуму.

2. Доказано, что использованная схема «водоохлаждаемого желоба» и выбранные условия формирования позволяют получать качественные тиксозаготовки из литейного эвтектического АЛ25 и деформируемых алюминиевых сплавов АК4-1, 1973, В95 и В96 со структурными параметрами, соответствующими требованиям пригодности для тиксоформинга. Получаемые тиксозаготовки имеют следующие структурные параметры: сплав АЛ25 средний эквивалентный диаметр $D_{cp} = 60,2$ мкм, фактор формы $F = 0,82$; сплав АК4-1 $D_{cp} = 86,2$ мкм, $F = 0,81$; сплав 1973 $D_{cp} = 79,6$ мкм, $F = 0,85$; сплав В95 $D_{cp} = 66,1 - 97,4$ мкм, $F = 0,81 - 0,87$ и сплав В96ЦЗ $D_{cp} = 65,1 - 92,1$ мкм, $F = 0,84 - 0,87$.

3. Разработанный способ получения порционных тиксозаготовок из эвтектического (АЛ25) и деформируемых (АК4-1, 1973, В95 и В96Ц3) алюминиевых сплавов может быть коммерциализован для производства заготовок массой до 6,0 кг.

4. Доказано, что тиксозаготовки, изготовленные предложенным методом из промышленного поршневого сплава АЛ25, и его аналоги, относящиеся по содержанию кремния к узкоинтервальным и исключенные в зарубежных рекомендациях из числа пригодных для тиксоформинга, в исследованных условиях обладают хорошей тиксоформуемостью и пригодны для переработки в твердотвердом состоянии методом обратного выдавливания во всем диапазоне типоразмеров исследованных модельных деталей.

5. Работа с тиксозаготовками из использованных деформируемых сплавов должна быть продолжена с привлечением специализированных прессов.

6. Технология переработки сплава АЛ25 в твердотвердом состоянии может быть рекомендована для промышленного освоения, поскольку позволяет за одну технологическую операцию получать высококачественные, близкие по размерам к детали заготовки поршней с гарантированными свойствами: $\sigma_B > 290$ МПа, $\sigma_{0.2} > 270$ МПа, $\delta > 4\%$, $HVI > 135$.

7. Тиксопрессованные заготовки поршня из сплава АЛ25, получаемые по предложенному в данной работе схеме и режимам процесса, обладают однородной микроструктурой, что позволяет использовать упрочняющую термическую обработку по режиму Т6 для любых условий эксплуатации.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Пат. 2444412 Российская Федерация, МПК В21С23/00, В21J5/06, В22D18/02. Способ тиксопрессования цилиндрической тиксозаготовки в режиме сверхпластичности ее твердой фазы / Б. И. Семенов, К. М. Куштаров, Н. А. Джиндо, Т. Б. Нго; Патентообладатель: МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, РФ; заявл. 13.09.2010; опубл. 10.03.2012. Бюл. № 7. 11 с.

2. Нго Т. Б. Исследование возможности тиксоштамповки деформируемых сплавов // Студенческий научный вестник. Сб. статей 4-ой студенческой научно-инженерной выставки «Политехника». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2009. Том IX. С. 112 – 119. (0,57 п.л.).

3. Нго Т. Б. Разработка сплава повышенной прочности, пригодного для тиксоформирования фасонных заготовок // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Студенческая научная весна – 2010. Том X, Часть 2. С. 313 – 315. (0,16 п.л.).

4. Нго Т. Б. Методика построения поля скоростей течения твердотвердого металла при прямом прессовании тиксозаготовок из алюминиевых сплавов // Студенческий научный вестник. Студенческая научная весна – 2011. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. Том XI, Часть 3. С. 118 – 120. (0,18 п.л.).

5. Rheological Effects in Constrained Flows of Viscous Fluids and the Necessity of Their Modeling in Composite Technologies Optimization / Т. В. Ngo [и др.] // Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications. Wrexham (North Wales, United Kingdom). 2012. С. 52– 57. (0,69 п.л./0,15 п.л.).

6. Нго Т. Б. Тиксоформирование фасонных деталей из алюминиевых сплавов // V-ая международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва. 2013. С. 253 – 255. (0,21 п.л.).

7. Нго Т. Б. Способ и устройство для получения тиксозаготовки большой массы и размера // VII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва. 2014. (0,15 п.л.).

8. Тиксоштамповка и тиксопрессование суспензированных сплавов. Часть 1 / Т. Б. Нго [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 2. С. 21 – 23. (0,37 п.л./0,15 п.л.).

9. Гидродинамика двухфазного течения и микроструктура детали. Часть 2 / Т. Б. Нго [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 3. С. 17 – 19. (0,37 п.л./0,15 п.л.).

10. Структура и механические свойства тиксоштампованных сплавов. Часть 3 / Т. Б. Нго [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 4. С. 10 – 13. (0,43 п.л./0,18 п.л.).

11. Семенов Б. И., Нго Т. Б. Методика построения поля скоростей течения твердого металла при прямом прессовании тиксозаготовок из алюминиевых сплавов // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. № 8. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/224547.html>. (0,16 п.л./0,10 п.л.).

12. Тиксоформинг высокопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu / Т. Б. Нго, [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». - Спец. выпуск № 3 «Прогрессивные материалы, конструкции и технологии ракетно-космического машиностроения». 2012. С. 148 – 165. (1,53 п.л./0,60 п.л.).

13. Семенов Б. И., Нго Т. Б., Семенов А. Б. Тиксоформирование фасонных деталей из алюминиевых сплавов // Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана «Актуальные проблемы развития ракетно-космической техники и систем вооружений». Сборник 75 лет факультету «Специальное машиностроение». 2013. № 606. С. 312-326. (0,94 п.л./0,40 п.л.).

14. Экспериментальное изучение процесса тиксоштамповки фасонной модельной детали из сплава АК7 / Т. Б. Нго [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 3. С. 22-27. (0,37 п.л./0,10 п.л.).

15. Нго Т. Б., Семенов А. Б., Семенов Б. И. Тиксоформуемость и свойства литейного поршневого сплава АЛ25 // Технология легких сплавов. 2014. № 2. С. 78 – 87. (1,25 п.л./0,50 п.л.).