

На правах рукописи

УДК 669.2.017:620.18

Куштаров Куштар Межлумович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ФАСОННЫХ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВОВ И МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ
НА АЛЮМИНИЕВОЙ ОСНОВЕ В ТВЕРДОЖИДКОМ СОСТОЯНИИ**

Специальность 05. 02. 01 – материаловедение
(машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискании ученой степени
кандидата технических наук



Москва 2004 г.



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

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор
Семенов Б.И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор
Масленков С.Б.

кандидат технических наук
доцент
Велицанский А.В.

Ведущее предприятие:

ФГУП ВИАМ

Защита состоится «16» июня 2004г. в 19 час. 30 мин.
На заседании диссертационного совета Д.212.141.04 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская улица, дом 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Телефон для справок: 267-09-63

Автореферат разослан «13» мая 2004г.

Ученый секретарь совета
к.т.н., доцент

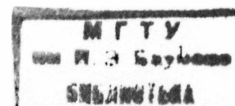


В.И. Семенов

Актуальность работы: Металлы были, являются и на ближайшую перспективу останутся основными материалами машиностроения. Однако существенные изменения претерпевают технологии производства фасонных заготовок, что сопровождается более широким использованием легких сплавов. Особенно ярко эта тенденция проявилась в массовом автомобилестроении. За последние 10 лет в Европе средний годовой прирост потребления алюминия составил 5 кг на автомобиль, т.е. около 7% в год.

К числу наиболее продвинутых технологий автомобилестроения в последние годы относят процессы, получившие общее название «SSM-технологии». В этих процессах формообразование детали начинают только тогда, когда вне формообразующей полости получена жидкометаллическая суспензия, содержащая ~ 50% твердой α -фазы. Такое разделение процесса формирования структуры материала детали позволяет использовать процессы, разворачивающиеся в пространстве и времени, для придания требуемой геометрической (недендритной) формы растущим кристаллам. Только оставшаяся неотвержденной или специально расплавляемая эвтектическая составляющая жидкости будет кристаллизоваться позже в формообразующей полости в гораздо более благоприятных условиях. При наложении на такую заготовку внешней силы и сдвига проявляется эффект тиксотропии: аномально резкое снижение вязкости суспензии, обеспечивающее возможность плавного течения металла и заполнения им сложной фасонной полости формы при литье и штамповке. Эффект тиксотропии в твердожидких металлах был открыт в 1971г. в лаборатории проф. М. Флеминга (Массачусетский технологический институт, США).

Эффект тиксотропии приводит к резкому снижению сопротивления растеканию. Так, при доле твердой фазы в суспензии $f_s=0,8$ сопротивление деформированию в пять раз ниже, чем у полностью отвержденного металла ($f_s=1,0$); при доле $f_s=0,6$ оно составляет около 3% от той же величины. Отсюда одинаково большой интерес и специалистов по обработке металлов давлением, и литейщиков к одной и той же тиксозаготовке, т.к. ее деформирование можно вести и на прессах ОМД и на литейных прессах-машинах ЛПД с контролируемой скоростью впрыска. В тиксотехнологиях используемому сплаву на первом этапе придают форму цилиндрической болванки соответствующего диаметра и длины. Такая болванка затвердевает полностью и охлаждается до комнатной температуры, но затем разрезается на мерные заготовки, которые используются после повторного нагрева и частичного расплавления в твердожидком состоянии. В этой технологии форма и размеры кристаллов α -фазы, созданные на первом этапе тиксоформирования, только в некоторой степени наследуются фасонной деталью. При реолитье процесс осуществляется непрерывно, т.е. без полного



охлаждения и повторного нагрева металла, но с промежуточной тепловой стабилизацией заготовки; в таком состоянии заготовка и поступает в форму.

В отечественной практике заготовительных производств SSM- технологии не используются, практически не проводилось параллельных разработок, отсутствует начальная базовая технология, не организовано производство специализированных заготовок (feed stock materials). Как показал опыт последних десятилетий, только такой подход позволяет осуществить выбор оптимального алгоритма решения задачи получения сбалансированного комплекса свойств (δ , $\sigma_{0,2}$, σ_b , σ_{-1}) в ответственных фасонных деталях из традиционных легких сплавов и металломатричных композитов на их основе.

Целью работы является исследование процесса и разработка технологий производства ответственных фасонных заготовок в машиностроении с использованием жидкометаллических суспензий с недендритной структурой твердой фазы (тиксотехнологии).

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1. Разработать доступный для машиностроительного предприятия технологический процесс получения тиксозаготовки (схема, условия и режимы формирования) из сплава АК7 и композитов на его основе с 5 – 20 вес % SiC_p и методику контроля количественных показателей ее качества.
2. Провести оптимизацию параметров всех стадий технологического процесса по количественным параметрам качества тиксоструктуры и определить условия (технологические окна) необходимых стадий процесса тиксоформирования.
3. На модельной детали изучить течение (сопротивление суспензии сдвигу) и особенности микро- и макроструктуры детали, формируемой в режиме тиксопрессования.

Научная новизна: Разработаны: оригинальная технология получения порционной тиксозаготовки, обеспечивающая формирование в ней квазиизотропного твердожидкого (суспензированного) материала из сплава АК7 (АЛ9) с требуемым уровнем качества недендритных кристаллов α -Al фазы по контролируемым параметрам структуры в любой части объема заготовки, позволяющая транспортировать заготовку как твердое тело (обладает свойствами геля до попадания в формообразующую полость), но одновременно легко приобретающей свойства золя (вязкая жидкость) и способность к сложному формообразованию под действием сдвигов и сохраняющей эту способность при изменении доли твердой фазы в интервале 40-90% при уровне напряжений существенно меньшем, чем предел текучести сплава при $T=T_{\text{solid}}$; технология получения тиксозаготовок из композитов на основе сплава АК7 (АЛ9), содержащего 5-20% вес кристаллических частиц SiC ; методика оценки состояния тиксоструктуры и ее динамики на всех стадиях процесса тиксоформирования, позволяющая выдавать техническое задание на проектирование технологического процесса штамповки (литья)

деталей с гранулированной или волокнистой структурой α -Al кристаллов в фасонном изделии.

Практическая ценность представленной работы заключается в том, что разработан оригинальный метод отдельной порции, позволяющий производить суспензию «по требованию» на любом машиностроительном предприятии, поставившем задачу освоения SSM- технологий. Использование описанного подхода в отечественном машиностроении позволит:

- получать фасонные заготовки гарантированного качества;
- обеспечить повышенную точность заготовок;
- снизить нормы расхода сплавов в 2,5 – 4 раза;
- сократить трудоемкость и энергозатраты в 2 – 3 раза;
- расширить на 30 – 50 % номенклатуру отливок, используемых для изготовления деталей и узлов высокой герметичности и прочности.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 3-ей Московской международной конференции «Теория и практика технологии производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов», Москва, 2003; на 7-th Int. Conf. Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Japan, 2002; на 19th ASK -Metal Forming, Aachen, 2004.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 4 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, общих выводов, списка использованной литературы из 60 наименований, изложена на 175 страницах машинописного текста, содержит 100 рисунков, 35 таблиц.

Основное содержание работы.

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

Первая глава посвящена обзору современного состояния исследований и уровню использования SSM-процессов за рубежом. Сопоставлены технико-экономические характеристики и механические свойства деталей, полученных тиксоформированием и традиционными способами литья и штамповки. Дан подробный анализ существующим методам получения тиксозаготовок. Проанализированы составы и свойства сплавов, опробованных за последние годы при изучении процессов тиксоформирования. Сформулированы требования к качеству и параметры структуры материала тиксозаготовки и дана методика их количественной оценки. На основании проведенного анализа обоснована постановка задач диссертационной работы.

Во второй главе описаны материалы, оригинальный метод получения тиксозаготовки и методика исследования качества структуры материала.

Обоснован выбор литейного сплава АЛ-9 (аналог АЗ56, АЗ57) и композитов на его основе, содержащих 5, 10, 20% керамических частиц SiC с размером частиц ~10 мкм в качестве объекта исследований.

Для получения заготовок требуемого качества с гранулированной структурой кристаллов α -твердого раствора предложено проводить начальную стадию первичной кристаллизации сплава с широким интервалом затвердевания в специальном тонкостенном теплоизолированном с торцов металлическом цилиндрическом сосуде (разъемном стакане), позволяющем использовать принцип совместного действия (синергетика) организованного движения слабо перегретой над температурой ликвидус металлической жидкости и стимулируемых медленным однонаправленным отводом тепла процессов зародышеобразования и объемного затвердевания с целью получения однородной суспензии с кристаллами недендритных форм, создающих совместным организованным действием условия для усиления локального конвективного тепло- и массопереноса, максимально снижающего термическое и концентрационное (примесное) переохлаждение расплава, и препятствующего таким образом потере устойчивости плоской границы раздела фаз при кристаллизации сплава.

Рассмотренный эффект совместного действия дополнен и усилен введением в охлаждаемую жидкость готовых зародышей твердой фазы, самопроизвольно или управляемо формируемых на стадиях перелива жидкого металла из плавильного агрегата на специальном желобе или при заполнении стакана. В суспензиях высокого качества количество формируемых кристаллов в стакане должно быть максимально большим, распределение по объему – однородным, а скорость их роста – минимальной. Используемая для этих целей схема процесса показана на рис.1.

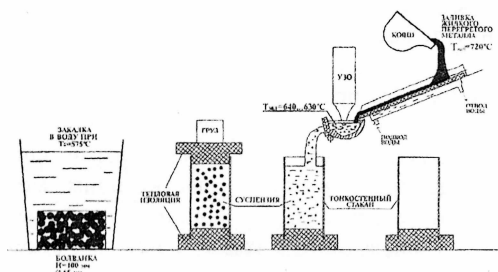


Рис.1.

Схема процесса формирования тиксоструктуры

Процесс подготовки суспензии к формообразованию завершается выравниванием температурного поля по всему объему заготовки при ~ 50%

твердой фазы. Если же заготовка готовится для последующего тиксоформирования, нужно зафиксировать твердожидкое состояние суспензии закалкой в воду без затрат энергии на выравнивание температур.

Используемый в исследованиях стакан имел диаметр 65 мм и высоту 100 мм. Заливка металла в стакан осуществляется через ламинизирующий пенокерамический фильтр. В данной схеме процесса УЗО в потоке перегретого металла может благоприятно влиять на все структурные параметры зародышей α -фазы перед их попаданием в контейнер. Расплав готовился в плавильной печи, где выполнены все необходимые требования подготовки жидкого металла. Заливка жидкого металла производится при температуре металла $\sim 720^\circ\text{C}$ на водоохлаждаемый наклонный лоток. Температура металла в металлоприемнике при заливке составляла $640\text{--}630^\circ\text{C}$, т.е. материал незначительно перегрет над линией ликвидус. После окончания заливки верхний торец стакана также теплоизолировался. Таким образом, в дальнейшем кристаллы α -фазы росли в условиях медленного теплоотвода.

В условиях затвердевания, создаваемых данной конструкцией контейнера и изоляцией торцов, металл достигает температуры $575\text{--}585^\circ\text{C}$ за период времени ~ 2 минуты). Высокая чувствительность формы растущих кристаллов $\alpha\text{-Al}$ фазы к большому набору начальных условий при попадании металла в контейнер (уровень перегрева над ликвидусом, характер течения при заполнении стакана, интенсивность охлаждения, внешние воздействия и температура, при которой они осуществляются и т. д.) потребовали проведения предварительных исследований по упрощенной схеме литья, позволяющей, однако, использовать принцип совместного действия.

В предварительных исследованиях были исключены охлаждающий лоток и УЗО. Расплав заливали в тонкостенный контейнер (стакан) по схеме, обеспечивающей ламинарное течение жидкости при температуре, близкой к ликвидусу.

Исходный материал – промышленный сплав АЛ9-1 (АК7пч). Химический состав сплава соответствовал ГОСТ 1583-89, литая микроструктура исходного сплава показана на рис.3.1, химический состав – в таблице 1.

Таблица 1.

Химический состав сплава при литье по схеме №1

Марка сплава	Массовая доля, %								
АК7пч (АЛ9-1) по ГОСТ 1583-93 Фактич.	Основные			Примеси (всего не более 0,6)					
	Mg	Si	Al	Mn	Cu	Zn	Ti	Zr	Be
	0,2-0,4	7,0-8,0	ост.	до 0,1	до 0,1	до 0,2	до 0,15	до 0,15	до 0,1
	0,35	6,31	ост.	0,03	0,08	-	-	-	Fe(0,22)

Расплавленный металл при $T_z = 630 - 640^\circ\text{C}$ заливали в стальную или титановую тонкостенную цилиндрическую обойму через нагретую

графитовую (керамическую) трубку с керамическим ламинирующим пенофилтром или через ламинирующий пенофилтёр, лежащий на тонкостенном металлическом цилиндре, скрепленном с торцевой теплоизолирующей вставкой.

В объеме стакана температурное поле охлаждаемого металла контролировалось пятью термопарами, расположенными по центру стакана на расстоянии 1 см друг от друга по высоте. Показания записывались самописцем ЭПП-09. По этим показаниям определялась длительность выдержки суспензии в стакане перед закалкой металла в холодную воду ($T_{\text{зак}} = 575^{\circ}\text{C}$).

Таким образом, при заливке через пенофилтёр через изменение гидродинамического режима заполнения стакана задавался внешний импульс для самоорганизующихся процессов. Заливка в стальной или титановый стакан обуславливалась разной теплопроводностью стали и титана ($\lambda_{\text{ст}} = 20,9 - 54,4 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, $\lambda_{\text{т}} = 9,5 - 16,0 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$), что позволяет выбирать интенсивность охлаждения заготовки. Полученный слиток разрезался по схеме, показанной на рис.2, для исследования однородности состава и структуры.



Рис.2.

Схема разрезки образца для исследования однородности состава и качества микроструктуры образца

Вторая стадия процесса (термическая стабилизация) – это выравнивание температурного поля твердожидкой заготовки. Выдержка металла в течение нескольких минут в интервале затвердевания при $T \approx 585^{\circ}\text{C}$ способствует повышению качества тиксоструктуры.

На всех этапах работы с тиксозаготовкой после изготовления шлифов микроструктура заготовок фиксировалась с помощью цифровой камеры, а информация обрабатывалась на компьютере.

После проведенной термообработки на тех же поверхностях повторно изготавливались шлифы и проводились исследования микроструктуры образцов. Для получения фотографий шлифов использовали цифровой фотоаппарат "Epson-600", присоединяемый к микроскопу "Neophot-21". Полученные фотографии обрабатывались с помощью компьютерной программы (KS-Lite Version 2,0). После оцифровки данных в программе Excel были произведены расчеты и получены значения фактора формы F_a , степени скелетизации S_a и среднего приведенного диаметра D_a для всех исследованных условий приготовления суспензии. Установленная динамика изменения геометрических форм α -Al фазы в зависимости от условий литья (заливки в стакан) и термической стабилизации представлены на рис.3 и в таблице 2.

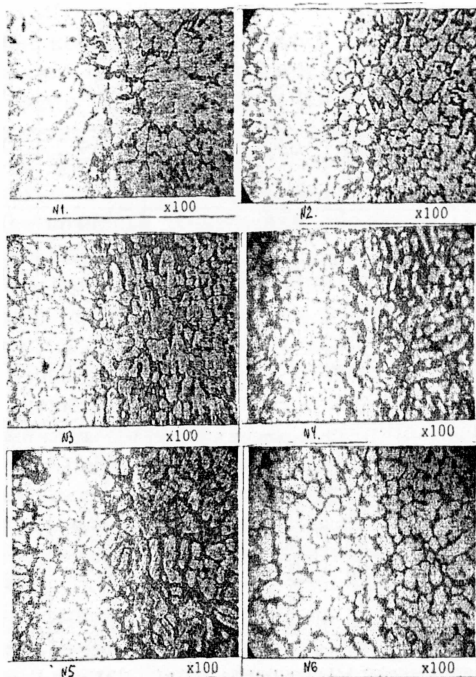


Рис.3. Изменение микроструктуры сплава АЛ9-1 в зависимости от условий литья

В тех же реперных точках, используя компьютерную программу KS-Lite, проведен статистический анализ всех исследуемых параметров структуры материала и получены статистически достоверные средние оценки.

Исследование показало, что статистически достоверные данные могут быть получены, если измерения проводить только в трех точках по радиусу (край, середина, центр) на половине высоты литой заготовки.

На образцах из сплава АЛ9, вырезанных из тиксозаготовки (литое состояние, закалка в воду) измерены механические характеристики материала. Образцы для механических испытаний изготовлены по ГОСТу 1497-84 и испытаны на разрывной машине «Instron» при скорости нагружения $V_H = 2$ мм/мин. Результаты испытаний: $\sigma_B = 232$ МПа; $\sigma_{0,2} = 121$ МПа; $\delta = 6\%$.

Таблица 2

№ п/п	Условия литья		Результаты измерений			
	Форма	$T_{\text{зал}}, ^\circ\text{C}$	F_a	$D_a, \text{мкм}$	C_a	$F_a \cdot C_a$
1 (рис.3.1)	литье в песчаную форму		5,6	240	0,33	1,68
2 (рис.3.2)	стальной стакан, ламинизирующий пенофильтр	630	2,1	83	0,16	0,32
3 (рис.3.3)	стальной стакан, турбулентная струя	630	3,8	64	0,20	0,76
4 (рис.3.4)	титановый стакан, ламинизирующий пенофильтр (керамическая труба)	630	2,5	74	0,21	0,53
5 (рис.3.5)	титановый стакан, ламинизирующий пенофильтр	640	2,2	69	0,24	0,53
6 (рис.3.6)	титановый стакан, ламинизирующий пенофильтр, термическая стабилизация (5 мин. при $T=580^\circ\text{C}$)	640	1,7	81	0,33	0,56

Таблица 3

№ реперной точки	диаметр реперной точки, мм	Содержание химических элементов, % (вес)					
		Al	Ti	Si	Mg	Fe	Cu
1-3	2	92,05	0,09	6,98	0,37	0,23	0,069
2-6	2	92,00	0,11	7,03	0,37	0,22	0,073
3-9	2	92,48	0,11	6,58	0,36	0,20	0,071
Среднее значение		92,18	0,10	6,86	0,37	0,22	0,071

Проведенное исследование показало, что охлаждение сплава АК7 в титановом тигле приводит к повышению качества тиксоструктуры слитка. В то же время, заливка через ламинизирующий пенофильтр также дает хорошие результаты даже при заливке в стальной стакан, что подтверждается исследованием микроструктуры слитка во всем его объеме.

Для исследования однородности состава и параметров F_a , C_a , D_a кристаллов первичной фазы в объеме заготовки использована схема, приведенная на рис.2. В выделенных реперных точках проводили локальный анализ химсостава и количественный статистический анализ параметров структуры

материала. Полученные усредненные данные химического анализа на установках «CAM SCAN Link» и «Foundy Master» сведены в таблицу 3.

В третьей главе приведены результаты оптимизации условий получения порционной заготовки с тиксоструктурой. Целью проведенных исследований являлись обеспечение основных технических характеристик материала и достижение следующих показателей качества структуры материала заготовки:

- фактор формы кристаллов твердого раствора $F_a \leq 1,8$;
- степень скелетизации суспензии $C_a = 0,1 - 0,3$;
- средний диаметр кристаллов $D_a = 80 - 100$ мкм;
- объемная доля α -фазы в суспензии $V_a \sim 50\%$;
- механические свойства в литом состоянии, не менее: $\sigma_s = 230$ МПа, $\sigma_{0,2} = 120$ МПа, $\delta = 15\%$ (после третьей стадии тиксоформирования).

Дальнейшие исследования проведены в лаборатории №1 ОАО ВИЛС по схеме, показанной на рис.1 со сплавом АЛ-9, по составу соответствующему А357 (7,4Si, 0,6Mg, 0,25Fe, 0,22Ti ост. Al, хим. анализ сплава при плавке).

Ниже представлены сравнительные результаты исследования структурных факторов α -Al фазы образцов до повторного нагрева, изготовленных по различным технологическим схемам из сплава А357 (А356 по схеме 1) до и после стабилизирующей термической обработки (585°C , 5 мин). Условия литья показаны в таблице 4.

Повторный нагрев проводился только для тех условий изготовления тиксозаготовок, где не были сразу же достигнуты установленные значения фактора формы F_a . Таким образом удалось оценить эффективность всех элементов процесса: выбранного контейнера, схемы литья с лотком, установить влияние УЗО на процесс зародышеобразования и повышение качества α -фазы в сплаве А357 и композитах, оценить дополнительный потенциал термической стабилизации. Каждое значение получено усреднением нескольких сотен измерений параметра, что позволяет утверждать, что использованная схема литья заготовки из исследованных сплавов обеспечивает получение практически недендритной формы зерна первичной фазы, а использование УЗО при низкой температуре металла, содержащего зародыши, не приводя к существенному уменьшению приведенного среднего диаметра зерен, положительно влияет на степень их скелетизации и фактор формы, тем самым приближая коэффициент качества K к минимально возможной величине как в матричном сплаве, так и в композитах на его основе.

УЗО и закалка тиксозаготовки, по-видимому, являются очень эффективным фактором «флегматизации» микроструктурной динамики суспензии, позволяющим, с одной стороны, резко увеличить продолжительность изотермической выдержки используемой заготовки в твердожидком состоянии и проводить нагрев в печи сопротивления без

заметного ухудшения качества тиксоструктуры, а с другой, – резко изменить режим формообразования фасонной детали, обеспечивая большую гибкость при проведении стадии прессования.

Таблица 4.

Технологические схемы, параметры процессы литья и геометрические характеристики недендритной структуры заготовок

№ п/п	Сплав	Технологическая схема					Структурные параметры материала заготовки			
		$T_{\text{лив}}$	$T_{\text{зал}}$	Желоб	$УЗО_1^*$	$УЗО_2^*$	D_{α_s} мкм	F_{α}	C_{α}	K
1.	A356	720	630	-	-	-	<u>75.8</u> -	<u>2.68</u> -	<u>0.13</u> -	<u>0.36</u> -
2.	A357	720	630	+	-	-	79.4 78.2	2.39 2.16	0.21 0.20	0.50 0.43
3.	A357	720	630	+	+	-	88.6 94.5	<u>2.53</u> 2.29	<u>0.18</u> 0.18	<u>0.44</u> 0.41
4.	A357	720	630	+	-	+	<u>81.3</u> -	<u>2.06</u> -	<u>0.12</u> -	<u>0.253</u> -
5.	A357	720	670	+	-	+	91.8 89.5	2.35 2.41	0.15 0.12	0.34 0.28
6.	A357+0,1Ti	720	630	+	-	+	<u>67.4</u> -	<u>1.89</u> -	<u>0.07</u> -	<u>0.132</u> -
7.	A357+5%SiC _p	720	630	+	-	+	<u>58.3</u> -	<u>1.7</u> -	<u>0.12</u> -	<u>0.17</u> -
8.	A357+10%SiC _p	720	630	+	+	-	73,1	1,91	0,05	0,08
9.	A357+20%SiC _p	720	630	-	-	-	60,1	2,22	0,03	0,07
То же, что 4, после длительного нагрева										
10.	A357 ($T=595^{\circ}\text{C}$, $t=65$ мин)	720	630	+	-	+	<u>81.3</u> 154,7	<u>2.06</u> 1,72	<u>0.12</u> -	<u>0.253</u> -
$УЗО_1^*$ – обработка металла в струе на выходе с желоба; $УЗО_2^*$ – обработка металла в металлоприемнике над ламинизирующим пенофильтром. Числитель: до повторного нагрева, знаменатель: после повторного нагрева.										

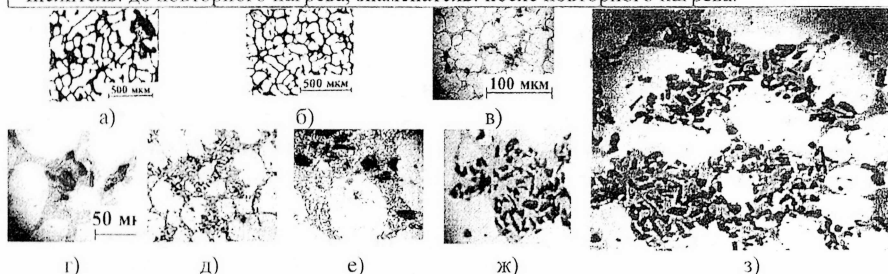


Рис.5. Микроструктуры тиксозаготовок матричного сплава A357: (а, б) и композитов (в, г, д, е, ж) на его основе; а) литое и б) термообработанное состояние матричного сплава; в)-з) литое состояние АКМ; в), г) – с 5% SiC; д), е) с 10% SiC; ж), з) - с 20% SiC

Для изучения микроструктурной динамики α -фазы в процессе нагрева литые образцы из матричного сплава А357 подвергали традиционному ($T=585^\circ\text{C}$, выдержка $\tau=5$ мин в разогретой до заданной температуры печи, нагрев с печью, закалка в воду) (2 в таблице 4) и длительному ($T=595^\circ\text{C}$, $\tau=65$ мин в разогретой печи, нагрев с печью, охлаждение на воздухе) нагреву (10 в таблице 4). Установлено, кратковременная термообработка только улучшает все параметры качества структуры, практически не влияя на средний диаметр зерна α -фазы. Длительный высокотемпературный нагрев также улучшает параметры качества материала заготовки, но средний диаметр зерна изучаемой фазы возрастает почти в 2 раза. Однако этот рост вызван не столько коагуляцией зерен, сколько исчезновением эвтектической фазы и превращением системы «Al(~50%) – эвтектика (~50%)» в систему «Al(~90%) – кремний (~10%)» с полигональной равноосной формой кристаллов α -Al фазы и мелкими идиоформными кристаллами кремния (рис.5). Полученные результаты позволяют сделать вывод, подтвержденный при исследовании третьей стадии процесса тиксопрессования, о том, что повторный нагрев мерных заготовок для получения конкретных деталей можно проводить как в печи сопротивления, так и в индукторе.

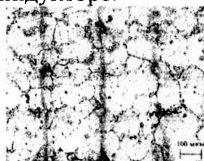


Рис.5. Тиксозаготовка из сплава А357 с «флегматизированной» микроструктурной динамикой после длительного нагрева

Таким образом, использование материалов с подготовленной без перемешивания структурой может стать одним из наиболее перспективных направлений тиксоформирования сложных фасонных деталей из традиционных алюминиевых сплавов и алюмоматричных композитов, армированных керамическими частицами.

В четвертой главе приведены результаты исследований макро- и микроструктуры тиксоштампованной детали типа «стакан». Полученные результаты использовали при разработке технологии тиксопрессования детали «чашка пружины» автомобиля ВАЗ из сплава А357. Проверка разработанного технологического процесса проведена в лаборатории кафедры «Теория и системы пластического деформирования» МГТУ «СТАНКИН» при участии д.т.н., проф. Кирдеева Ю.П., структурные исследования выполнены в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Микроструктура детали, полученной из тиксозаготовки, принципиально отличается (рис.6) не только характерной для исходной заготовки недендритной структурой в участках, не испытывавших больших

деформаций, но, главным образом, волокнистой структурой α -Al фазы в местах, подвергавшихся наиболее интенсивной деформации.

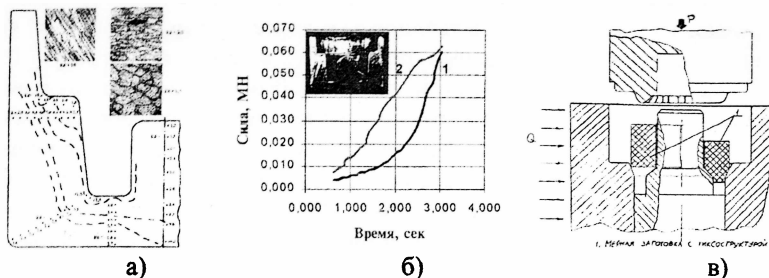


Рис.6. Карта зон вытянутости кристаллов α -Al фазы в штампе а); кинетика прессования и моделирование теплового и деформированного состояний заготовки б); схема тиксопрессования чашки из мерной заготовки с тиксоструктурой в)

Сложный характер структуры штамповки потребовал специального моделирования условий тиксопрессования. Эта работа впервые в нашей стране была выполнена в рамках договора о содружестве МГТУ им. Н.Э. Баумана и ОАО «ВИЛС» специалистами ОАО «ВИЛС» под руководством с.н.с. к.ф.-м.н. В.Н. Серебряного. Численное моделирование процесса штамповки по программе Q-form 3.0 осуществляли в рамках вязкопластической модели методом конечных элементов. Необходимые для моделирования реологические и теплофизические характеристики сплава А357 получали из эксперимента и литературных данных.

Процесс деформирования заготовки занимает ~3секунды, что совпадает с временным интервалом роста силы прессования в эксперименте, совпадают и максимальные величины сил прессования (рис.6). Однако, в рамках данной модели и схемы прессования наиболее интенсивно деформации должны развиваться у вертикальных стенок пуансона, а наименее интенсивно – у вертикальных стенок матрицы. Повсюду, кроме центральной стержневой части, градиентное поле интенсивностей деформаций в модельном эксперименте изменяется монотонно. Только в центральной части осесимметричной детали при моделировании появляется немонотонное изменение интенсивностей деформаций.

Микроструктура реальной штамповки должна при высокой доле твердой фазы отличаться от микроструктуры заготовки в местах интенсивных деформаций. На самом деле изученная микроструктура очень неоднородна. На рис.6 показаны элементы микроструктуры различных участков сечения детали. Обнаружено совпадение моделируемых и фактических интенсивностей деформаций около внешних углов и вдоль вертикальных

поверхностей внедряемого инструмента, выразившееся в появлении волокнистых форм α -фазы в этих участках детали, и существенное отличие моделируемых и фактических деформаций в объеме детали. Вторая, не прогнозируемая зона интенсивного деформирования начинает формироваться в момент внедрения инструмента на оси заготовки в самой нижней ее части, и эта область, также характеризующаяся волокнистой формой кристаллов α -фазы, распространяется вверх и в стороны вместе с деформацией теплового узла, обеспечивая перенос металла при обратном выдавливании и одновременно формируя нетрадиционную макроструктуру в объеме фасонной детали. По видимому, появление второй зоны интенсивного деформирования позволяет объяснить заметное различие в средней части модельной и экспериментальной кривых, характеризующих силовые условия прессования детали. Одновременно, обнаруженный эффект позволяет рассчитывать на создание волокнистой структуры в наиболее ответственных участках тиксоштампованных деталей.

Реализация технологии тиксопрессования детали «чашка пружины» передней подвески легкового автомобиля ВАЗ из алюминиевого сплава и композита также осуществлялась в лаборатории кафедры «Теория и системы пластического деформирования» МГТУ «СТАНКИН» при участии д.т.н., проф. А.Э. АРТЕСА. Ввиду отсутствия финансирования работ в исследовании использовали оснастку, разработанную для жидкой штамповки алюминиевого сплава (рис.6).

Масса новой детали, полученной, как методом тиксоформирования, так и жидкой штамповкой, уменьшена более чем в 2,5 раза (160 г - новая и 440 г - базовый вариант).

Деформирование осуществляли на гидравлическом прессе с усилием прессования 3000 кН, обеспечивающем начальную скорость прессования 7 мм/сек. Температура прессформы выбрана равной 300°C, выдержка заготовки под давлением - 30 сек. Длительность нагрева заготовки в разогретой до заданной температуры печи составляла 30-40 мин, готовность материала к тиксопрессованию определяли специальным твердомером.

Впервые использована кольцевая профилированная заготовка двух видов, полученная механической обработкой из цилиндрической болванки. Геометрия тиксозаготовки и схема прессования обеспечивают относительный сдвиг металла и инструмента во всем объеме детали.

Макро- и микроструктуру штампованной детали исследовали в плоскости симметрии с помощью микроскопа Neofot-21. Результаты исследования показаны на рис.7.

Тиксозаготовка из матричного сплава отличается очень высокой степенью чувствительности зерен α -фазы к интенсивности деформаций. При деформировании заготовки гранулированные зерна очень легко вытягиваются в волокна вдоль линий тока с отношением l/d , достигающим 100 и более в

наиболее ответственных участках детали, а зерна эвтектического кремния измельчаются до микронного размера. Параметры геометрии зерен α -Al фазы в штампованной детали приведены на рисунке.

Волокнистый характер α -Al фазы приобретает в большей части объема детали. Вытянутость алюминиевой фазы характерна и для тиксопрессованного композита, однако, при той же интенсивности деформаций она резко снижается, сохраняясь только на участках интенсивного взаимодействия суспензии с формообразующей поверхностью (у выступов пуансона и в местах поворота потока металла). Даже при предельно высоких увеличениях в структуре материала деталей не обнаруживается усадочных дефектов.

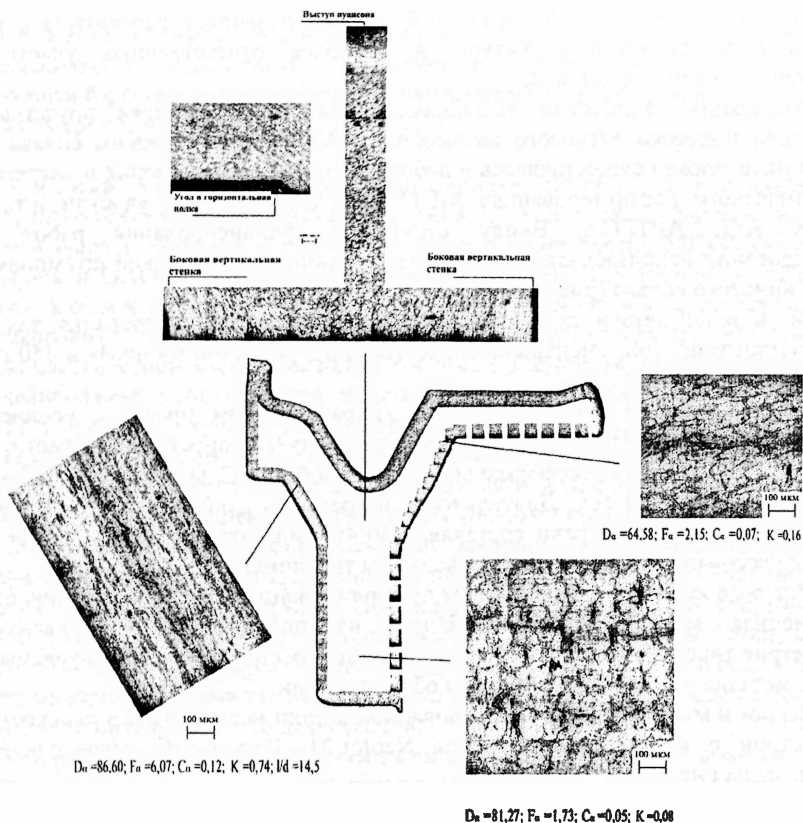


Рис.7. Фрагменты микроструктуры штампованной детали из сплава А357

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ:

На основе системного анализа и экспериментальных исследований всех стадий процесса тиксоформирования фасонных заготовок из сплава АК7 (АЛ9) и композитов на его основе получены следующие основные результаты:

1. Исследованием условий литья порционной заготовки установлены факторы, которые могут влиять на качество тиксоструктуры материала. Показано, что литье слабоперегретого над ликвидусом сплава ($10...15^{\circ}\text{C}$) в тонкостенную ($1,5 - 2$ мм) титановую обойму является достаточным условием получения недендритных форм $\alpha\text{-Al}$ кристаллов и однородной мелкозернистой структуры в заготовках $\varnothing 65...90$ мм. Измеренные механические свойства ($\sigma_b=230\text{МПа}$, $\sigma_{0,2}=121\text{МПа}$, $\delta=6\%$) такой заготовки, закаленной из твердого состояния, без гомогенизирующей обработки и деформирования, превышают соответствующие показателям качества, устанавливаемые ГОСТ 1583-89 для данного сплава в отливках.
2. Проведена оптимизация условий получения порционной заготовки с тиксоструктурой из сплава АК7 и армированных керамическими частицами SiC композитов, содержащих 5 – 20 вес % наполнителя. Определены требования к оснастке и теплофизические условия процесса, обеспечивающие достижения к моменту начала формообразования детали требуемых параметров α -фазы в суспензии ($F_a \leq 1,8$; $C_a = 0,3 - 0,5$; $D_a = 80 - 100$ мкм) во всем объеме заготовки.

Установлены: технологическое окно активного формирования зародышей в перегретом расплаве ($640^{\circ}\text{C} < T_p < 730^{\circ}\text{C}$ на водоохлаждаемом лотке), технологическое окно диспергирования и кавитационного воздействия на диффузионный пограничный слой зародышей в потоке жидкого металла (УЗО в металлоприемнике $630^{\circ}\text{C} < T_p < 640^{\circ}\text{C}$) и условия заполнения стакана ($T_p \approx 630^{\circ}\text{C}$, через ламинирующий пенофильтр). Выводы о высоком качестве заготовки подтверждены большим объемом металлографических исследований и статистической обработкой анализируемой информации.

3. Разработана и экспериментально проверена малозатратная схема экологически чистого процесса получения заготовок с тиксотропной структурой, которая на данном этапе исследований может быть реализована для производства фасонных деталей массой до 7 кг на любом машиностроительном предприятии, поставившем задачу освоения как технологий тиксоформирования, так и нового реолитья.
4. Показано, что полученная в оптимальных условиях заготовка обладает «флегматизированной» структурой и может находиться в печи сопротивления при рабочей температуре прессования суспензии без существенного ухудшения параметров α -фазы длительное время (30 – 40 минут), что в несколько раз превышает допустимую длительность 2-й

стадии процессов тиксоформирования, известную из опубликованных в литературе данных.

5. На модельной детали («стакан») и промышленной детали «чашка пружины» автомобиля ВАЗ проведено исследование 3-й стадии процесса тиксопрессования из полученных заготовок в режиме интенсивной пластической деформации каркаса суспензии ($f_s \approx 0,7$, $V_p = 0,007$ м/с). Установлено, что в этих условиях из заготовки с «флегматизированной» глобулярной структурой α -фазы в суспензии легко формируется фасонная деталь с волокнистой структурой α -фазы не только в местах относительного перемещения пуансона и заготовки, но и в большей части объема детали. Таким образом, не только расширено возможное технологическое окно тиксопрессования сплавов А356, А357 (АЛ9), но и доказано, что технологическое окно процесса с $f_s > 0,7$ может быть использовано не только для подпрессовки, но и для формообразования деталей.
6. Экспериментально установлены зоны большой пластической деформации тиксозаготовки, не предсказываемые в рамках вязкопластической модели в программе Q-form 3.0. Полученные результаты могут быть использованы как для корректировки модели течения материала заготовки в формообразующей полости, так и для разработки процессов тиксопрессования ответственных фасонных деталей в режиме интенсивных пластических деформаций α -А1 фазы, давая возможность создать в детали волокнистую (композитную) не имеющую пор структуру материала в наиболее ответственных и уязвимых для дефектов участках конструкции.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Семенов Б.И., Куштаров К.М. Современные тенденции совершенствования технологий заготовительных производств //Металлургия машиностроения.- 2003.-№2.- С. 29-40; 2003.-№4.- С. 26-31.
2. Семенов Б.И., Куштаров К.М. Некоторые итоги промышленного освоения технологий рео- и тиксолитья //Металлургия машиностроения. – 2003.- №6.- С. 32-37; 2004.-№1.- С. 39-44.
3. Семенов Б.И., Куштаров К.М. Эффективное изготовление и рациональное использование заготовок с тиксоструктурой – главное условие успеха при промышленном освоении новых технологий //Заготовительные производства в машиностроении.-2004.-№4.-С.3-15.
4. Комбинированная обработка сплава при порционном изготовлении тиксозаготовок / Г.И. Эскин, Б.И. Семенов, В.Н. Серебряный, Ю.П. Кирдеев //Металлургия машиностроения.- 2003.-№2.- С. 41-45.

Куштаров К.М. **D 1680394**
 Исследование процесса
 формирования фасонных
 изделий из сплавов и
 металломатричных композ...
 2004 0-00

27/04/06	Физик ХМ	
26.10.11г.	Исследователь	

D1680394

**ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
 обозначенного здесь срока**

Подписано к печати 11 мая 2004 г.

Заказ 65т. Объем 1 п/л. Тираж 100 экз.

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.

105005, Москва, 2-я Бауманская улица, дом 5.