

**Современные требования и  
возможности подготовки структуры  
специализированных заготовок из  
Al-сплавов, пригодных для переработки  
Тихо- и МIM методами**

**А.Б. Семенов, Б.И. Семенов  
МГТУ им. Н.Э. Баумана**

# **СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ КОММЕРЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИТЬЯ ТВЕРДОЖИДКОГО АЛЮМИНИЯ В ЕВРОПЕ И КНР**

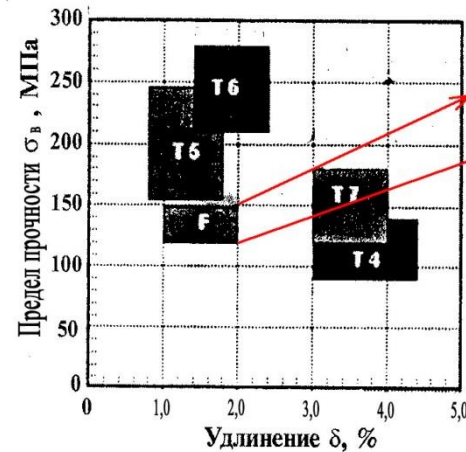
**Современные требования к подготовке структуры  
специализированных заготовок из Al-сплавов и  
зарубежный опыт организации их переработки  
Thixo- и MIM методами**

# Потенциал литейного сплава как ресурс конкурентоспособного производства отливок в традиционных и новых схемах управления структурообразованием

Механические свойства при растяжении и твердость при комнатной температуре стандартных силуминов (ГОСТ 1583-89)

Марка сплава	Способ литья	Вид термической обработки	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
			ГОСТ 1583-93 не менее		
1	2	3	4	5	6
<i>I группа сплавов</i>					
AK12 (AL12)	ЗМ, ВМ, КМ	—	150	4,0	50
	К	—	160	2,4	50
	Л	—	160	1,0	50
AK9 (AK9)	ЗМ, ВМ, КМ	T2	140	4,0	50
	К	T2	150	3,0	50
	Л	T2	150	2,0	50
AK9ч (AL4)	З, В, К, Д	—	160	1,0	60
	К, Д, ПД	T1	200	0,5	70
	ЗМ, ВМ	T6	240	1,0	80
AK9ч (AL4—1)	К, КМ	T6	250	1,0	90
	З, В, К, Д	—	150	2,0	50
	К, Д, ПД	T1	200	1,5	70
AK8 (AL34)	ЗМ, ВМ	T6	230	3,0	70
	К, КМ	T6	240	3,5	70
	З	—	160	3,0	50
AK7 (AK7)	К, Д, ПД	T1	200	2,0	70
	ЗМ, ВМ	T6	250	3,5	70
	К, КМ	T6	270	4,0	70
AK7ч (AL9)	З	T5	300	2,0	85
	З	T4	260	4,0	70
	К	T5	340	4,0	90
AK7пч (AL9—1)	Л	—	210	2,0	70
	Д	T1	230	1,0	80
	Л	T2	180	2,5	60
AK7пч (AL9—1) (A356)	З	—	130	0,5	60
	К	—	160	1,0	60
	З	T5	180	0,5	75
AK7пч (AL9—1) (A357)	К	T5	200	0,5	75
	Д	—	170	1,0	50
	ПД	—	150	0,5	65
AK10Cu (AK10Cu)	З, В, К	—	160	2,0	50
	Л	—	170	1,0	50
	З, В, К, Д	T2	140	2,0	45
AK7пч (AL9—1)	КМ	T4	190	4,0	50
	З, В	T4	180	4,0	50
	К, КМ	T5	210	2,0	60
AK7пч (AL9—1)	З, В	T5	200	2,0	60
	ЗМ, ВМ	T5	200	2,0	60
	К	T6	230	1,0	70
AK7пч (AL9—1)	ЗМ, ВМ	T7	200	2,0	60
	ЗМ, ВМ	T8	160	3,0	55
	К	T6	240	1,0	70
AK7пч (AL9—1)	К	T7	200	2,0	60
	К	T8	160	3,0	55
	З, В	T4	200	5,0	50
AK7пч (AL9—1)	К, КМ	T4	230	5,0	50
	З, В	T5	240	4,0	60
	ЗМ, ВМ	T5	240	4,0	60
AK7пч (AL9—1)	К, КМ	T5	270	4,0	60
	ЗМ, ВМ	T6	280	2,0	70
	К, КМ	T6	300	3,0	70
AK7пч (AL9—1)	Д	"	200	1,0	50
	Д	T2	170	2,0	45
	ЗМ, ВМ	T7	210	2,5	60
AK7пч (AL9—1)	ЗМ, ВМ	T8	170	3,5	55
	К	—	170	1,0	70

## Потенциал литейного сплава АК7 по ГОСТ 1583-93



Aluminium Pechiney  
сплав ALTHIX

{F} – минимальный потенциал традиционных способов литья  
{T} – минимальный потенциал литейного сплава АК7 в традиционных способах управления, используя термические обработки

## Потенциал зарубежных аналогов литейного сплава АК7

Тиксолитье (фирма Aluminium Pechiney, Франция, торговая марка сплава – ALTHIX)					
Состав (близкий эквивалент)	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	Режим термообработки	
AlSi7Mg0,3Sr (A356)	105	230	18	F	литье
	170	260	15	T5	закалка в воду, 160°C 6ч
	230	300	14	T6	540°C 10ч, закалка в воду, 160°C 6ч
AlSi7Mg0,6Sr (A357)	110	240	17	F	литье
	205	275	10	T5	закалка в воду, 170°C 6ч
	290	345	10	T6	540°C 10ч, закалка в воду, 170°C 6ч

Уже к началу 1980-х годов изменение свойств сплава одной и той же марки в зависимости от способа литья в определяющей степени стали связывать с изменением морфологических параметров фаз в структуре материала.

Главными контролируемыми факторами структуры стали морфологические параметры твердой  $\alpha$ -Al фазы (средний диаметр зерна  $D_\alpha$ , фактор формы зерна  $F_\infty$ , степень скелетизации  $S_\infty$ ). Главное условие выбора рабочего окна процесса – чувствительность доли жидкой фазы к изменению температуры в момент начала формирования детали.

# SEMI-SOLID CASTING OF ALUMINIUM FROM AN INDUSTRIAL POINT OF VIEW

Johannes Winklhofer

SAG Motion GmbH, 5651 Lend Nr. 25, Austria

## Литье алюминия в твердожидком состоянии с точки зрения организации промышленного производства

**Keywords:** Aluminium, Semi-Solid, Casting, Thixocasting, Rheocasting, Industrial Application  
алюминий, литье твердожидкого металла, тиксолитье, реолитье, промышленное производство.

- Компания SAG (Salzburger Aluminium AG) является поставщиком топливных баков, LNG и гидравлических резервуаров, воздушных резервуаров и других изделий для коммерческого транспорта и автомобильной промышленности. Основная продукция компании относится к сварным изделиям, но SAG также имеет 25-летний опыт поставщика как заготовок (SSM), так и отливок из твердожидкого металла (SSP) с того момента, как в 1993 году в Lend (Австрия) был организован первый собственный участок тиксолитья. С тех пор SAG вышел на рынок разнообразной литейной продукции, где конкурирует с другими производителями литья. Серийное производство началось в 1993 году с освоения одной машины ЛПД Idra 840 т. В 2001 году была установлена вторая литейная машина Böhler. До 2009 года годовой объем производства отливок составлял до 400 000 шт/год. Объемы производства начали снижаться, когда на коммерческий рынок вышло новое реолитье.
- После 2009 года стало очевидным, что при ограниченном количестве покупателей тиксозаготовок тиксолитье становится не конкурентоспособным из-за высокой стоимости сырьевого материала (тиксозаготовки). Начались исследования, направленные на промышленное освоение в SAG реолитья для крупносерийного производства. Результатом стала организация двух участков нового реолитья на дочернем предприятии SAG Fueltech AB в Роннеби, (Швеция). С 2014 года на дочернем предприятии Fueltech начато производство 3 различных детали с максимальным годовым объемом производства 250000 шт/год для грузовика Volvo Trucks, после чего в 2017 году была организована шведская дочерняя компания «SAG Austria industrialized Rheocasting».
- Сегодня производство отделения SAG в Швеции ориентировано на реолитье толстостенных конструкционных деталей для промышленных коммерческих автомобилей, а отделение в Австрии специализируется на тиксолитье тонкостенных отливок для сварных изделий и на производстве герметичных деталей для автомобильной промышленности.

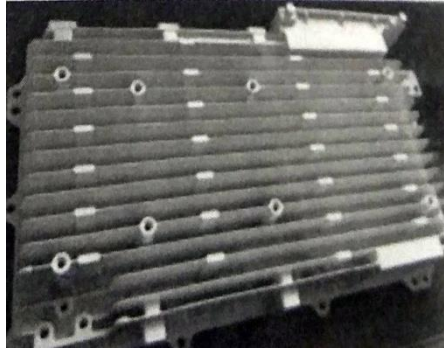
# Примеры изделий, производимых фирмой SAG методами тиксо и реолитья

			
(a) Монтажный кронштейн для холодильника (автомобилестроение)	(c) Арматура для кровли (ж-д транспорт)	(d) Дверной шарнир (автомобилестроение)	(e) Шарнир задней двери (автомобилестроение)
			
(f) Труба холодильника (автомобилестроение)	(g) Кронштейн рамы мотоцикла	(h) Крышка головки цилиндра (морской транспорт)	(i) Крышка сосуда воздушного давления (автомобилестроение)
			
(j) Форсунка сосуда высокого давления (автомобилестроение)	(k) Опорный кронштейн бампера (автомобилестроение)	(m) Шарнир задней двери (автомобилестроение)	(n) Верхняя рама (автомобилестроение)
			
(o) Опора крышки для крыши кабриолета (автомобилестроение)	(p) Кронштейн датчика температуры (автомобилестроение)	(q) Крышка головки цилиндра (мотоцикл)	(r) Багажная стойка (мотоцикл)
			
(x) Подставка (автомобилестроение)	(aa) Опора кабины (грузовой автомобиль)	(t) Подлокотник (авиация)	(u) Сварной сосуд высокого давления

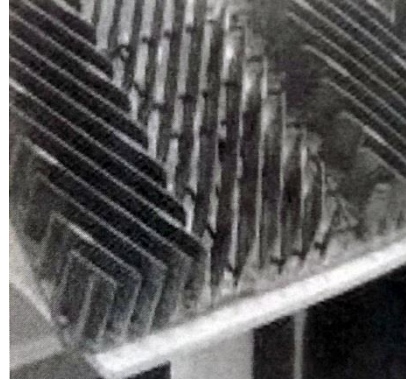
# Примеры освоения реолитья в крупномасштабном коммерческом производстве в Китае.

Основная отрасль машиностроения - электроника и телекоммуникации

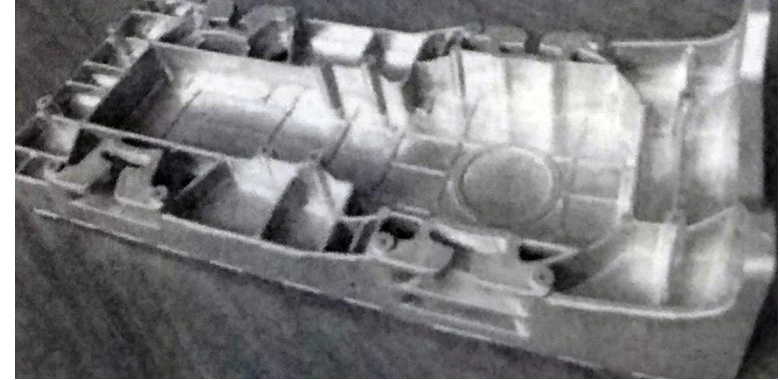
Производители: KinRui Hi-Tech Co. Ltd и RheoMetal Light Metal Co., Ltd



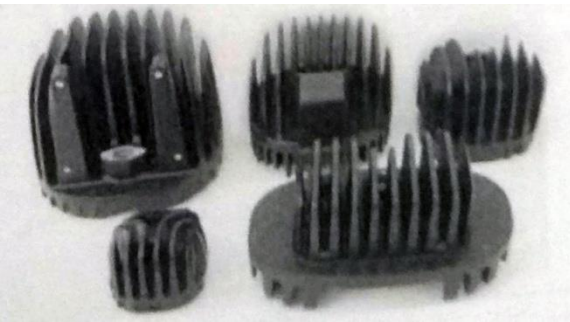
Теплообменник для электроники. Массово производится с 2014 г в количестве 700000 шт/год.



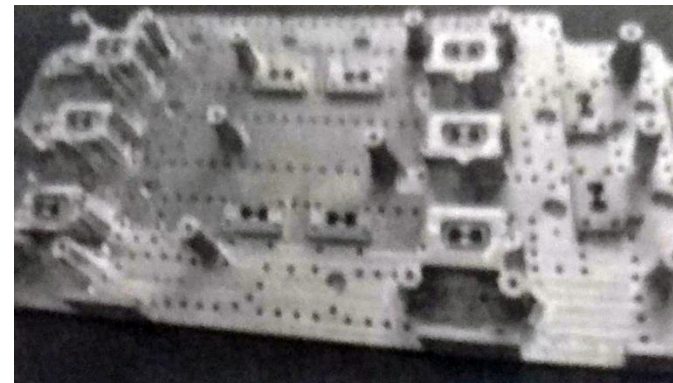
Теплообменник для использования в мобильных 5G сетях с радиатором 780x460x76 мм с особой конструкцией W-образных ребер, разделенных в центре, и с минимальной толщиной ребра 1,2 мм. Деталь производится из сплава Al8Si. на машине ЛПД 3000 т.



Наружная оболочка антенны 650x270x160 мм вес 9кг. Высокие требования к прочности, термическая обработка T5, старение при 180 °C 12 часов, предел текучести 140 МПа, предел прочности при растяжении 230 МПа.



Корпуса светодиодов с тепловыми радиаторами для транспортных средств, используемых в сложных условиях (горнодобывающая промышленность). Произведено более 500000 штук



Опора телекоммуникационной системы. Отливка с толщиной опорной плиты 4 мм и толстостенными выступами толщиной 15 мм из сплава Al8Si.

# Проблема «цена – качество»: пошаговое сравнение конкурирующих процессов современного литья под давлением и твердожидкого литья для алюминия

## Литье под давлением



## SSM литье



Используется обычный для литья шихтовой материал. Небольшая разница в цене исходного материала для большинства SSM отливок из таких сплавов, как A356 и 357 (у фирмы SAG это 5 сплавов Thixalloy 615 - Thixalloy 680, различающихся содержанием Mg) в том, что тиксозаготовки готовятся на основе первичного слитка, в то время как традиционное литье обычно производится из вторичных сплавов. Это различие в цене, однако, невелико, поскольку цена первичных сплавов, как правило, только на 5-10% выше, чем у вторичных сплавов.

Если выбор между тиксо и реолитьем сделан в пользу рео, небольшие затраты могут быть связаны с дополнительной дегазацией металла. Проведение сравнительного анализа затрат на создание шликера в SSM литье сложно, и оценка затрат производится индивидуально для конкретной отливки. Индукционный нагрев тиксозаготовки обеспечивает требуемый уровень контроля за качеством суспензии, но требует дополнительных затрат.

Стадия формования SSM- отливки считается производителями много более эффективным этапом по сравнению с традиционным ЛПД.

Предпочтительна термообработка по режиму T5. Обработка T6 увеличивает затраты на ~ \$0,50 за 1 кг литья и часто требует правки деталей после ТО.

В целом, в SSM литье затраты выше, чем в ЛПД, а наибольшие затраты связаны с производством пригодной для литья тиксозаготовки.

# Оптимизация организации промышленного производства и выбор способа литья алюминиевой детали с позиции «цена - качество» (Johannes Winklhofer, SAG Motion GmbH, Austria, S2P, 2018)

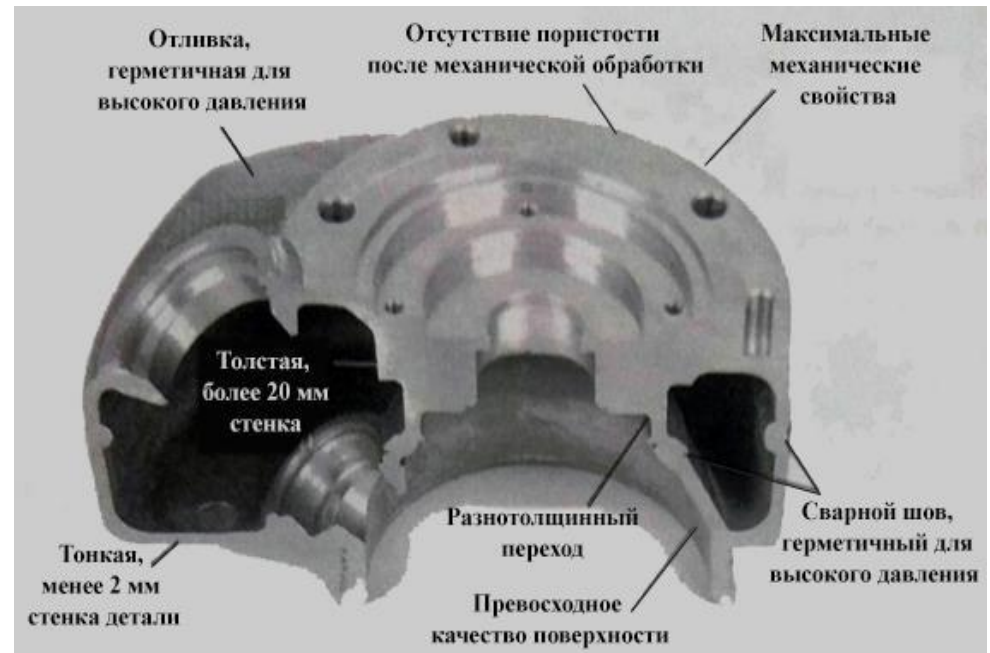
## Достоинства SSP отливок:

- Возможность снижения веса, возникающая из-за повышенных механических свойств;
- Превосходная свариваемость и герметичность;
- Точная геометрия отливки;
- Улучшенное качество поверхности;
- Функциональная интеграция конструкции изделия
- Более высокая тепло и электропроводность;
- Высокая производительность;
- Увеличенный срок службы прессформы;

Характеристики материала и детали, определяющие интеллектуальный уровень и конкурентоспособность литейной SSP продукции могут и должны рассматриваться как преимущества на начальной стадии проектирования детали

Опыт работы SAG на конкурентном рынке литейного производства показывает, что недостаточно обладать только одним из упомянутых качеств, чтобы компенсировать дополнительные инвестиции или более высокую цену за одну отливку. Чтобы создать уникальное торговое предложение и получить прибыль от организации SSP производства, должно быть реализовано одновременно несколько преимуществ, которые приведут к улучшенным свойствам изделия по сравнению с продуктом традиционного способа литья.

Пример: в SAG представленное серийное сварное изделие производится по частям: верхняя часть - реолитьем; нижняя часть - тиксолитьем.





# Последовательные этапы разработки при подготовке в SAG промышленной технологии производства детали методом литья твердого металла

(Справа изделия SAG Fueltech Sweden и Volvo Trucks)



Этапы разработки при подготовке к внедрению промышленной технологии

Компьютерная модель планируемой к SSP производству детали

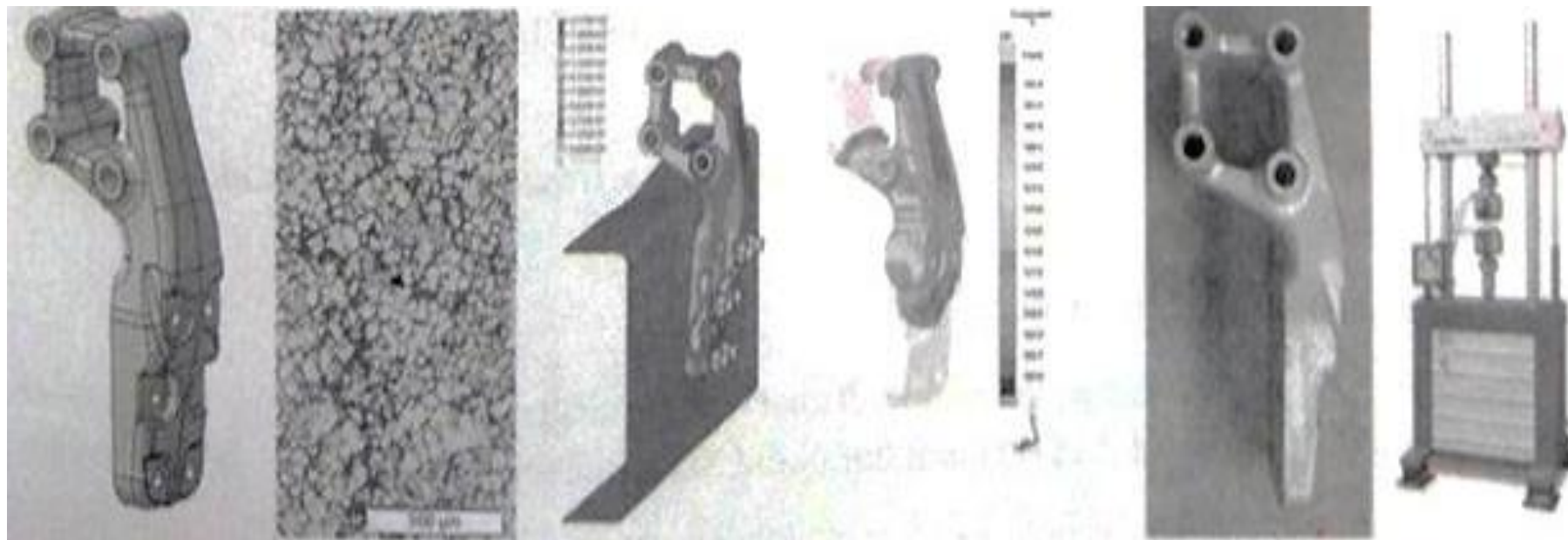
Выбор способа литья, вариант термообработки и характеристики материала

Конечноэлементный анализ напряжений и усталостной прочности детали

Осуществимость процесса литья: моделирование стадии литья

Производство прототипа

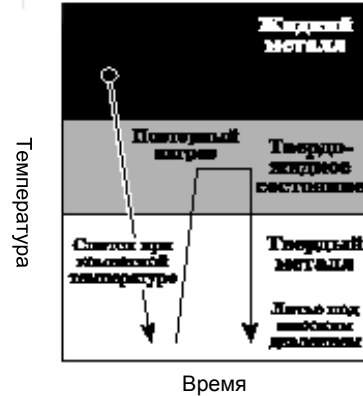
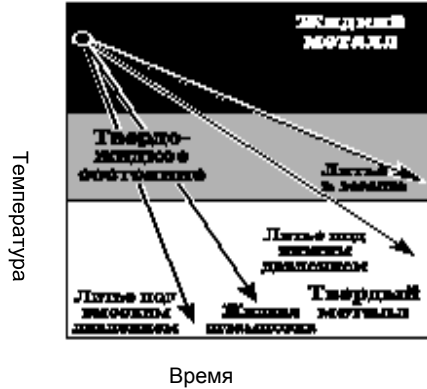
Испытания материала и изделия



**Две парадигмы теории и практики формирования кристаллического строения литых заготовок: фундаментальная материаловедческая и научно-производственная проблема литейной технологии, - производство фасонной заготовки с заданными эксплуатационными свойствами, - может быть решена двумя принципиально различными путями**

**I** - парадигма: сначала придание металлу изделия требуемой формы, используя жидкое состояние сплава, затем – формирование структуры отливки.

**II** - парадигма: сначала формирование заготовки со структурой, близкой к структуре материала изделия, затем – придание заготовке формы изделия, используя тиксотропное состояние суспензий и технологии литья шликеров под давлением.

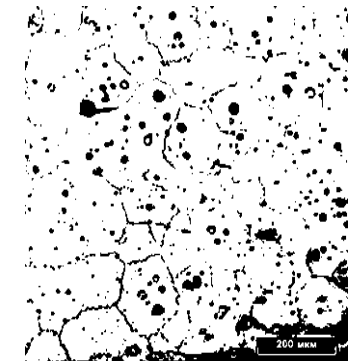
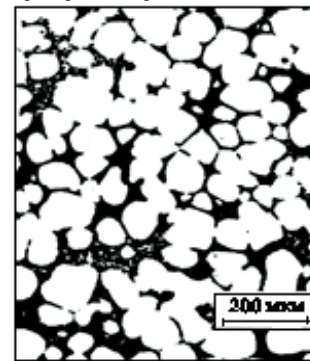
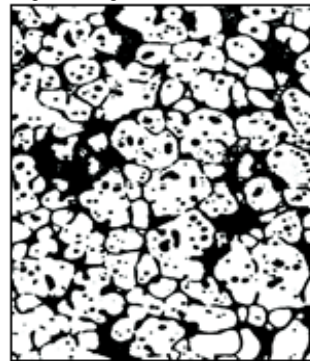
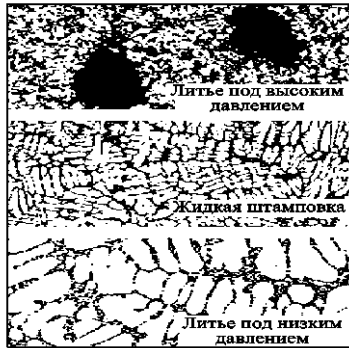


Структуры, формируемые в традиционных способах литья, стандартами не регламентируются

Структуры, формируемые тиксолитием, регламентируются стандартом NADCA и критериями пригодности

Структуры, формируемые реолияем, регламентируются стандартом NADCA и критериями пригодности

Структуры, формируемые MIMом, стандартами не регламентируются



Зарождение и рост кристаллов, формирующих литую структуру заготовки, начинается и завершается в литейной форме

1. Скорость затвердевания отливки - важнейший фактор литейной технологии.
2. Расчет скорости затвердевания элементов тела отливки – основная научная задача теории.
3. Установление таких зависимостей для промышленно важных сплавов, гарантирующих соответствие достигаемых в отливке свойств в выбираемом способе литья требованиям стандарта, – основная инженерная задача теории.

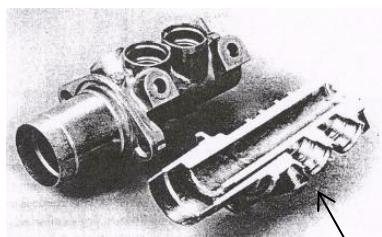
Зарождение и рост кристаллов, формирующих литую структуру заготовки, начинается и на 50-100 об. % завершается вне литейной формы до начала формирования литого изделия

1. Реологические свойства заготовки – важнейший фактор технологии тиксотропных материалов при моделировании стадии литья.
  2. Построение полной кривой течения материала заготовки в широком интервале температур – основная научная задача теории.
  3. Установление таких зависимостей для промышленно важных сплавов и проверка пригодности моделей течения для конкретных условий литейной формы – основная инженерная задача теории.
- Возможные пути решения реологической и тепловой задачи формирования отливки и ее структуры из жидкого металла и из порошков показан стрелками.

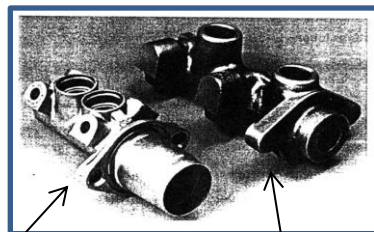
**Изученные в период 1980 - 2010 гг и рекомендуемые для получения отливок с заданными свойствами из стандартизованных Al-сплавов промышленные процессы, доступные зарубежным литейщикам, отечественным производителям не известны и в конкурентной борьбе не используются**



# Тихо-технологии формообразования в твердотвердом состоянии эффективность замены традиционного способа литья на SSP)



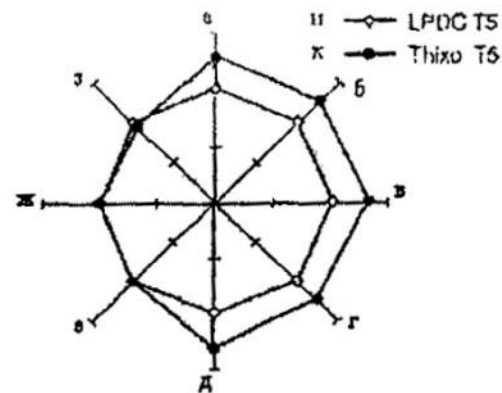
новая технология (тиксолитье, тиксопрессование)



традиционная технология (литье в кокиль)

Эффективность тиксолитья и тиксоштамповки детали «главный тормозной цилиндр легкового автомобиля» из сплава АК7 (А356/А357) в сравнении с литьем в кокиль

Эффективность тиксолитья в сравнении с литьем под давлением с применением вакуума (LPDC)



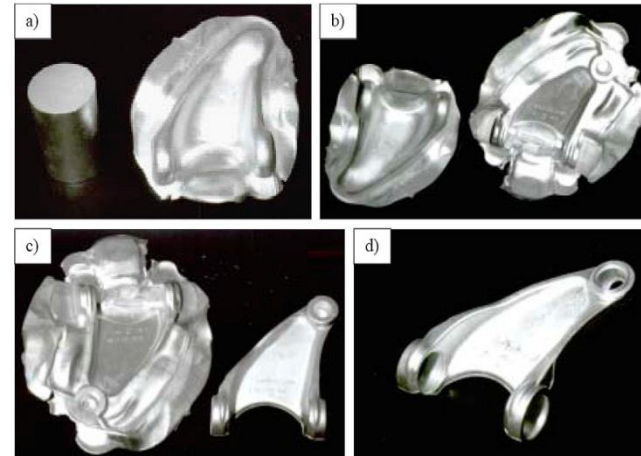
- а) уменьшение толщины стенок изделия
- б) снижение веса детали
- в) рост предела текучести
- г) рост прочности
- д) рост ударной вязкости
- е) уменьшение количества дефектов
- ж) качество поверхности
- з) себестоимость

Процесс	Сплав (состояние заготовки)	Масса порции, г	Мин. толщина стенки, мм	Масса детали*, потери г/%	Не гидр-плотн. %	ТО	Произв-одит., шт/час	Число ступеней мех. обр.
Кокиль (традиционный процесс)	А356 (жидкость)	765	6,3	<u>450</u> 40%	2	Т6	24	18
SSM-штамповка SSM-литье (новые процессы)	А357 (Rheo-слиток Ø76 мм)	450	-	<u>390</u> 13%	0	Т5	150	-
	А357 (HMD слиток Ø76 мм)	441	3,2	<u>390</u> 11,5%	0	Т5	2,4·10 <sup>6</sup> шт/год	5

\* - чугуный главный тормозной цилиндр автомобиля ВАЗ весит ~1300г., аналогичный по геометрии алюминиевый – 765 г, тиксоформуемый - 450 г.. Замена способа литья ведет к двукратному уменьшению толщины стенки детали при росте ее гидрплотности, к снижению потерь металла на механообработку с 40% до 11,5%, к повышению производительности

# Технология нового реолитья

(эффективность замены деформируемого алюминиевого сплава литейным сплавом)



Кронштейн передней подвески автомобиля Alfa Romeo 156 (Stampal S.p.a.) и технологические переходы (a,b,c) его изготовления объемной штамповкой из прессованного слитка



Тот же кронштейн, изготовленный методом нового реолитья

# Эффективность замены деформируемого алюминиевого сплава литейным сплавом по эксплуатационным, технологическим и экономическим требованиям

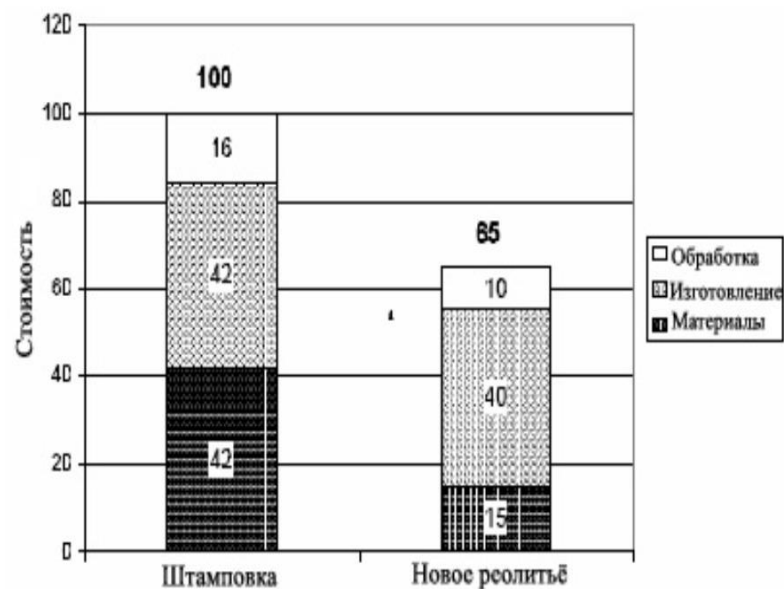
## Механические свойства сплавов в детали

Процесс	Механические свойства			
	$\sigma_{\epsilon}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	<i>НВ</i>
Штамповка сплава АА6082 Т6	315-330	275-290	8-12	110
Реолитье сплава А356 Т6	310-330	255-275	9-14	110-120
Требуемый минимум	310	260	7	90

## Сравнительная эффективность технологий

Процесс	Масса расходуемого металла, г	Масса фасонной заготовки, г	Масса обработанной детали, г
Штамповка сплава АА6082	1570	800	590
Реолитье сплава А356.0	1850	600	560

## Экономическая эффективность



# Управление структурообразованием в рамках модели разрушения дендритов вне формы механическим перемешиванием (тиксо) или тепловым воздействием (рео)

1973г. Москва, Flemings M.C., Mehrabian R: *Casting Semi-Solid Metals*, 40-th International Foundry Congress, Исследования специалистов школы проф. М.Флемингса, превратившись в изучение вязкости и эффекта тиксотропии кристаллизующихся металлов, открыли путь к разработке группы процессов, получивших обобщающее наименование *тиксоформинг*, активно коммерциализуемых в зарубежном машиностроении с 1990-х гг. 2007г. Москва, 1 конференция ART Aluminium, проф. P. Kapranos, доклад “Thixoforming: from automotive to aerospace” П. Капранос, «Тиксоформинг: от автостроения до авиации и космоса» // Цветные металлы, 2008, №1. «Процесс тиксоформинга имеет преимущества как перед литьем, так и перед ковкой — микроструктура мелкозернистая, однородная и практически лишена пор; продукция может подвергаться термообработке и приобретать лучшие механические свойства, чем после литья.



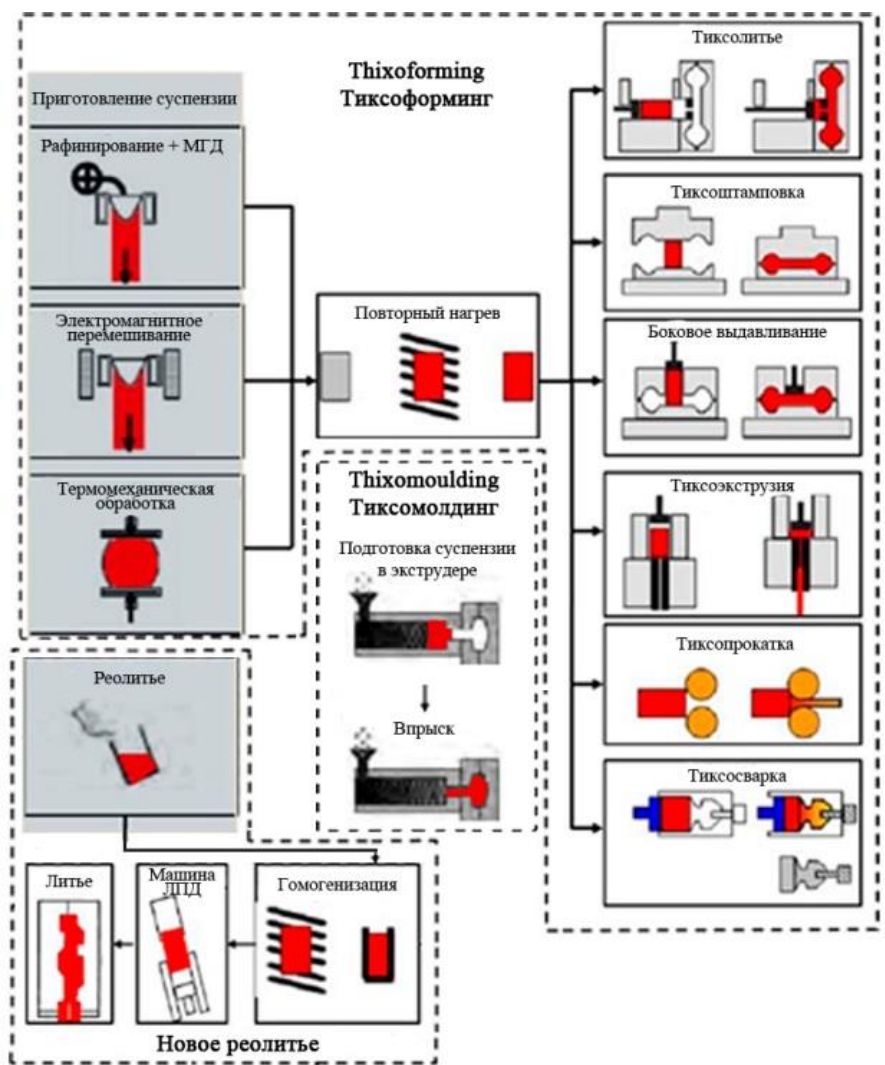
Переработка металла в твердожидком состоянии, реализуемая с фазой интенсивного перемешивания (тиксоформинг) и без интенсивного перемешивания (новое реолитье).

I, II и III - стадии технологического процесса

# Схемы тиксоформинга и критерии пригодности специализированных заготовок

«Тиксоформинг - это прецизионное формование металлов в твердожидком состоянии, т.е. в интервале температур затвердевания или плавления. Во время тиксоформинга материал, пребывающий в таком состоянии, самопроизвольно не растекается, но обладает тиксотропными свойствами, т.е. быстро разжижается и течет, как жидкость, при сдвиговой деформации».

## Множество методов тиксоформинга



## Критерии пригодности тиксозаготовок

Параметр	Формула	Целевые значения
Средний диаметр зерен	$D_{cp} = f(T, c)$	$D_{cp} < 100 \text{ мкм}$
Фактор формы зерна	$F = \frac{4\pi A}{U^2}$	$F > 0,6$
Степень скелетизации (относительная длина границ $\alpha - \alpha$ ) кристаллов $\alpha$ -фазы в суспензии	$C^{PS} = F^S \frac{2S^{SS}}{2S^{SS} + S^{SL}}$	$0,4 < C^{PS} < 0,6$
Степень объемной скелетизации	$V_c = V_s C_s$	$0,1 < V_c < 0,3$
Сдвиговая вязкость	$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1}$	$\eta \approx 0,001 - 0,01 \text{ Пас}$
Гранулированная доля твердой фазы в суспензии - $f_s$	$f_s = 1 - \left( \frac{T_M - T_L}{T_M - T} \right)^{\frac{1}{1-p}}$	40 - 60 % масс.
Интервал плавления $\Delta T = T_L - T_S$	$\Delta T = f(c, T, p)$	максимальный 130 °C минимальный 70 °C
Темп изменения доли при 50 % твердой фазы	$df_s / dT$	$< 0,015$
Температурная чувствительность	$Df_s = 0,01 \left( \frac{df_s}{dT} \right) T_{ss}$	$\leq 0,06$
Температурная чувствительность	$\Delta T_{40-60}$	$> 10 \text{ }^\circ\text{C}$



## Химические составы литейных алюминиевых сплавов, рекомендуемых стандартом NADCA (2006 г) для промышленного использования при переработке в твердожидком состоянии

Элемент, вес. %	Сплавы									
	355	319	319S	356	357	380	390	336.0	АЛ30	АЛ25
Si	4,5-5,5	5,5-6,5	5,5-6,5	6,5-7,5	6,5-7,5	7,5-9,5	16-18	11-13	11-13	11-13
Fe	0,60	1,0	0,15	0,20	0,15	2,0	0,50	<1,2	<0,7	<0,8
Cu	1,0-1,5	3,0-4,0	2,5-3,5	0,20	0,50	3,0-4,0	4,0-5,0	0,5-1,5	0,8-1,5	1,5-3,0
Mn	0,50	0,50	0,03	0,10	0,03	0,50	0,10	<0,35	<0,2	0,3-0,6
Mg	0,4-0,6	0,10	0,3-0,4	0,25-0,45	0,45-0,6	0,10	0,45-0,65	0,7-1,3	0,8-1,3	0,8-1,3
Ni	-	0,35	0,03	-	-	0,50	-	2,0-3,0	0,8-1,3	0,8-1,3
Zn	0,35	1,0	0,05	0,10	0,05	3,0	0,10	<0,35	<0,2	<0,5
Pb+Sn	-	-	0,03	-	-	0,35	-	-	<0,05	<0,12
Ti	0,25	0,25	0,20	0,20	0,20	-	0,20	<0,25	<0,2	0,05-0,2
Sr	-	-	0,01-0,05	-	-	-	-	-	-	-
сумма примесей	0,15	0,50	0,10	0,15	0,15	0,50	0,20	0,05	<0,2	<0,2
Al	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.

Алюминиевые сплавы, рекомендуемые для использования в современных способах производства, аналогичны с используемыми в классических методах литья, но далеко не все пригодны для использования. Так, непригодными считаются сплавы, выделенные в таблице красным цветом. Пригодные для переработки сплавы производятся в виде слитков длиной 3-6 метров указанных ниже диаметров, и поставляются потребителю в виде мерных порционных заготовок.

Диаметр заготовки, мм				
76	88	100	126	152

# Научные вопросы проектирования сплавов для тиксо-технологий

## Критерии пригодности Al-заготовок и выбор «рабочего окна» для формования отливки

COMPREHENSIVE MATERIALS PROCESSING. EDITOR-IN-CHIEF Saleem Hashmi, 2014.

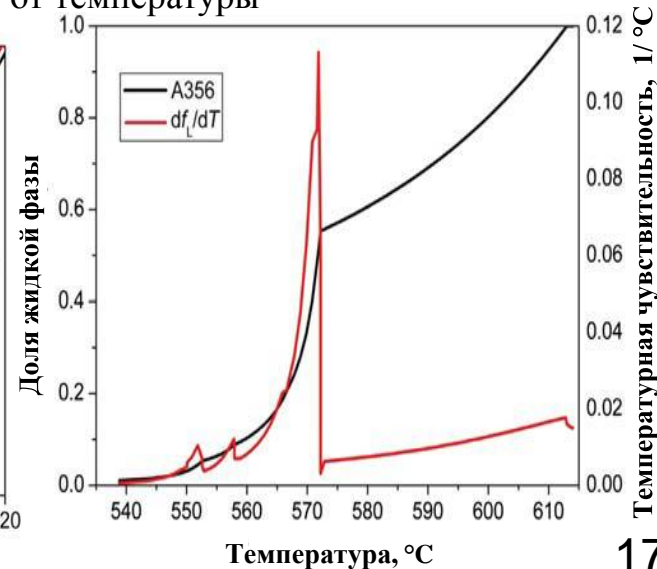
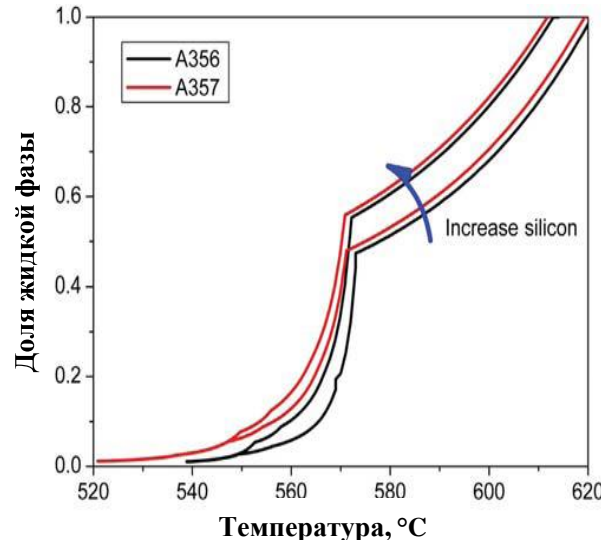
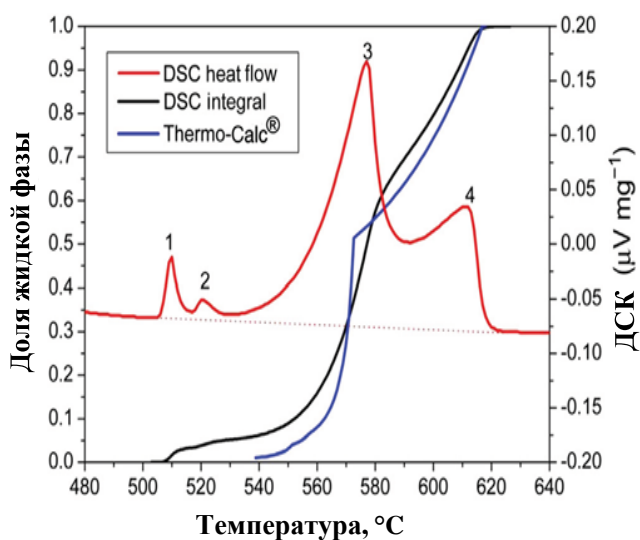
VOLUME 5. Casting, Semi-Solid Forming and Hot Metal Forming. E.J. Zoqui, **Alloys for Semisolid Processing**

«Оптимальное содержание жидкой фазы  $f_L = 40 - 60$  об.%». Прогнозы программного обеспечения Thermo-Calc и метода DSC совпадают, так как оба они указывают на плавление эвтектики при отношении 50% твердой/50% жидкой фаз. В наиболее широко используемых алюминиево-кремниевых сплавах A356 и A357 переходу сплава соответствует «колени», т.е. температурный интервал расплавления эвтектической фазы. Для A356 это интервал температур 570-573 °C, и ожидаемое колено содержит 47-57% жидкости, тогда как в A357 колено формируется при температурах 565-568 °C с 48-58% жидкости из-за различий в химическом составе.

«Температурная чувствительность ) доли жидкой фракции к изменению  $(df_L / dT)_{f_L=0,4}$  должна быть настолько низкой, насколько возможно». После неустойчивого эвтектического плавления, которое характеризуется красным пиком на графике справа при величине общей доли жидкой фазы в интервале значений 0,4-0,6, чувствительность резко снижается до легко контролируемого значения в интервале 0,01-0,015 °C<sup>-1</sup>. Выбираемое рабочее окно может находиться в «удобном» диапазоне 575-585 °C или 560-565 °C, что и рекомендуется для тиксотехнологий.

Прогнозируемый твердожидкий переход в сплавах A356 и A357, оцениваемый в Thermo-Calc и методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК)

Температурная чувствительность твердожидкого перехода, ожидаемого в сплаве A356 в зависимости от температуры



# Промышленное освоение массового производства Al отливок тиксо-методами

# Организация массового MIM производства изделий (ARC Group Worldwide, Inc., США)



## 2007. Международная конференция «Литье алюминия»

Дебиндинг и спекание



Контроль качества готовых деталей

Новые процессы позволяют:

- уменьшить использование материала до абсолютно необходимого, увеличивая одновременно нагрузки, т.е. позволяют формировать новую концепцию функций и технологичности детали;
- уменьшить время подготовки серийного производства детали;
- уменьшить стоимость детали;
- изготавливать детали из материалов с плохой обрабатываемостью, так как сложные геометрические переходы могут формироваться с высокой размерной точностью сразу без механической обработки;
- изготавливать детали с более высокими механическими свойствами, меньшими допусками, чем традиционное литье.



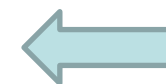
Участок литья под давлением

# Основные этапы МІМ процесса и потребность в прикладных и фундаментальных исследованиях

# Материалы и типовые приложения для использования



Применение	Материалы и требования
Инженерные конструкции	Высокопрочные стали прочность более 2 ГПа
Микроэлектроника	W-Cu, Mo-Cu, AlN Теплопроводность
Медицина/стоматология	Ti, Ti-6Al-4V Биосовместимость
Магниты	Fe, Fe <sub>14</sub> Nd <sub>2</sub> B, SmCo <sub>5</sub> Намагниченность
Акустика	Пьезокерамики Частотная характеристика
Износостойкие изделия	ZrO <sub>2</sub> , WC-Co Твердость, прочность
Контроль загрязнения	Ni <sub>3</sub> Al, NiAl, TiAl Устойчивость к окислению
Инструментальная керамика	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> Твердость, ползучесть
Литейные стержни	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> Прочность, вымываемость
Термостойкие изделия	W, Mo, MoSi <sub>2</sub> Термостойкость
Аэрокосмические изделия	Ni суперсплавы Усталостная прочность



Al сплавы

# Тиксо- и МІМ-технологии – группа новых инновационных технологий

## **С общих для Тіхсо- и РІМ позиций металлургии тиксотропных материалов на стадии формования (т.е. литья) шликера оптимизироваться должны не морфология твердой фазы и общее содержание жидкости, а количество структурно свободной жидкости!**

*Семёнов А.Б., Семёнов Б.И.* Рациональный выбор материалов и эффект синергии междисциплинарных подходов при выборе технологии производства точной фасонной заготовки из алюминиевого сплава // Заготовительные производства в машиностроении. – 2014. – №9. – С. 3-10.

*Нго Т.Б., Семёнов А.Б., Семёнов Б.И.* Тиксоформуемость и свойства литейного поршневого сплава АЛ25 // Технология легких сплавов. – 2014. – №2. – С. 78-87.

*Ханина М.А., Русланцев А.Н., Первушин А.В., Семёнов А.Б., Семёнов Б.И.* Синергетический подход к анализу и использованию РІМ-технологии // Технология металлов. – 2015. – №5. – С. 36-44.

*Семёнов А.Б., Гавриленко А.Э., Семёнов Б.И.* Литейные технологии нового поколения, их освоение и развитие в России. Ч. 1. У истоков новой технологической парадигмы // Технология металлов. 2016. – №4. – С. 13-25.

*А.Б. Семенов, А.Н. Муранов, Б.И. Семенов.* Литейные технологии нового поколения, их освоение и развитие в России. ч. 2-1. Физическая природа и особенности моделей материалов с тиксотропными свойствами // Технология металлов. – 2016. – № 8. – С. 8-17. ч. 2-2. – 2016. – № 9. – С. 7-18.

*A.B. Semenov, A.E. Gavrilenko, B.I. Semenov* Next-generation casting technologies and their adaptation and development in Russia: I. At the beginning of a new technological paradigm // Russian metallurgy (Metally). 2016. – № 13. – P. 1231-1240.

*Семёнов А.Б., Корневич А.П., Куцбах А.А., Семенов Б.И.* Новые задачи и рубежи в технологической подготовке выпускника вуза машиностроительного профиля // Технология металлов. 2017. – №. 5. – С. 38-48.

*Семенов А.Б., Семенов Б.И.* Две парадигмы технологий литья изделий из металлов // Известия вузов. Машиностроение. 2017. – № 5. – С. 79-98.

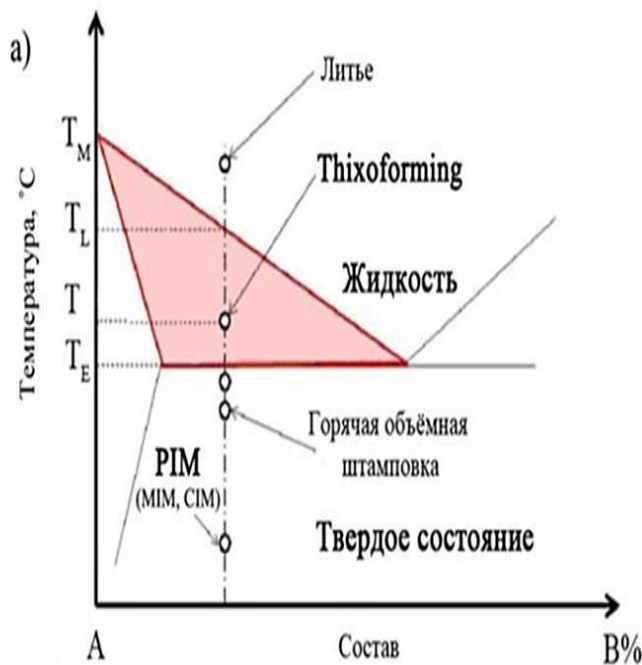
*Семёнов А.Б., Куцбах А.А., Муранов А.Н.* Моделирование процессов инъекционного литья полимерно-порошковых смесей (PIM) при подготовке производства фасонных деталей: : Труды 4-й МНПК «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн – 2017». Тамбов, 2017, С. 441-446.

*Семёнов А.Б., Муранов А.Н., Куцбах А.А., Семенов Б.И.* Инжекционное литье структурированных многофазных материалов // Вестник РУДН: Инженерные исследования. 2017, т.18, №4. С.407-425.

*Semenov A.B., Ngo Thanh Binh, Semenov B.I.* THIXOFORMING OF HYPEREUTECTIC ALSi12Cu2NiMg AUTOMOTIVE PISTONS, S2P-2018, China, 2018.

**1-й фундаментальный принцип:** тиксоформованные детали (в центре) и PIM изделия (справа), аналогичные по сложности, могут быть изготовлены из частиц с различной морфологией, часто далекой от сферической

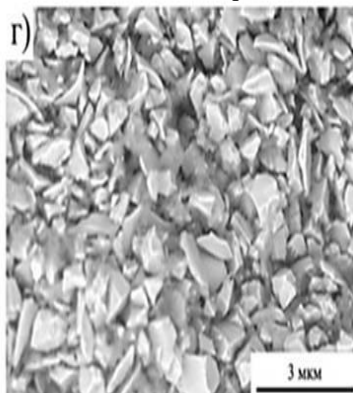
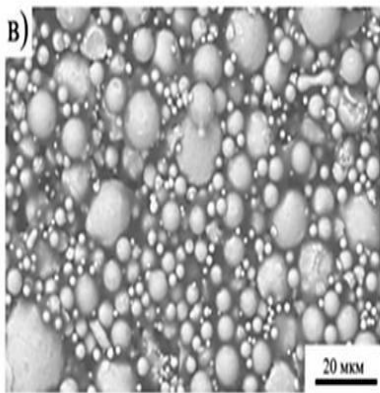
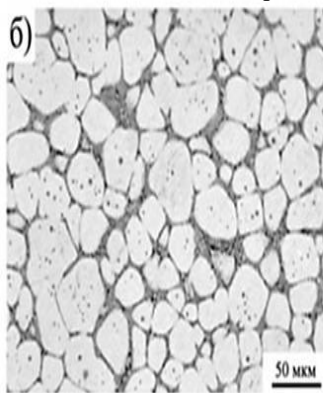
**2-й фундаментальный принцип** - на стадии формования детали от заготовки должно отводиться такое количество теплоты, которое минимально уменьшит долю структурно свободной жидкости



Тихо: 50 об.% тв. фазы

PIM: 60 об.% тв. частиц

60 об.% тв. фазы



Продукция тиксоформинга



и тиксомолдинга



Продукция CIM



и MIM производства

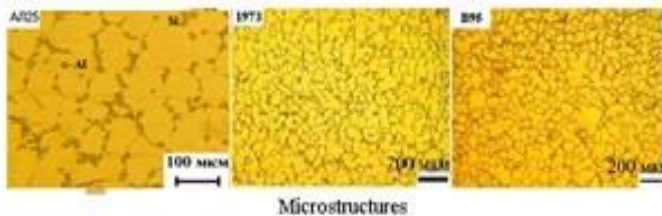
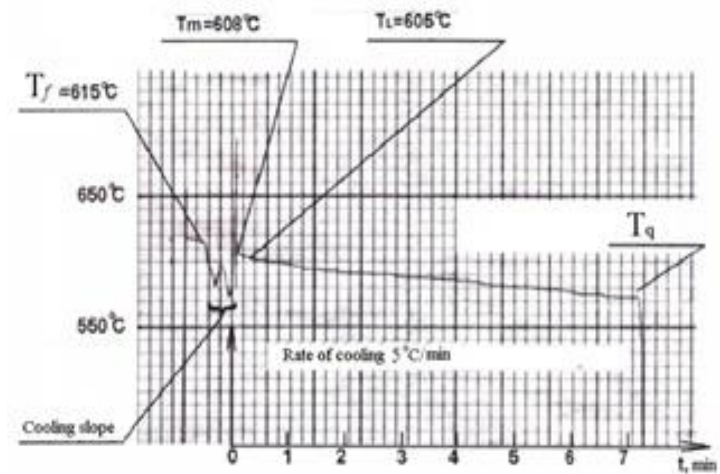
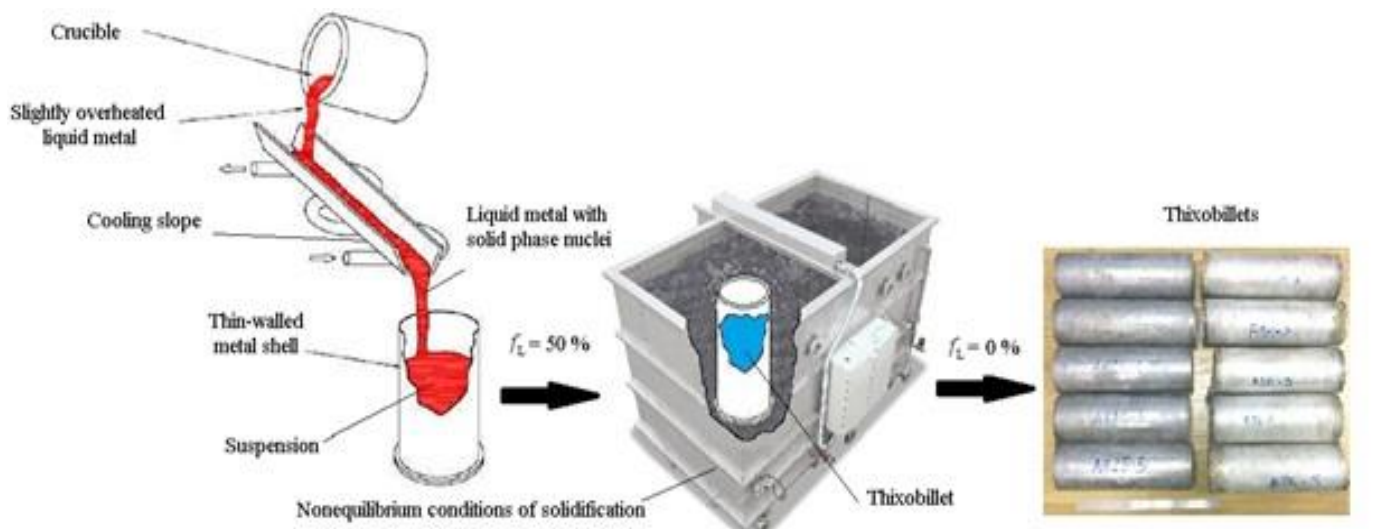


При формовании точных фасонных деталей из многофазных твердожидких материалов решающим условием их переработки является не сфероидизация твердых частиц, а достаточное для текучести количество структурно свободной жидкости.

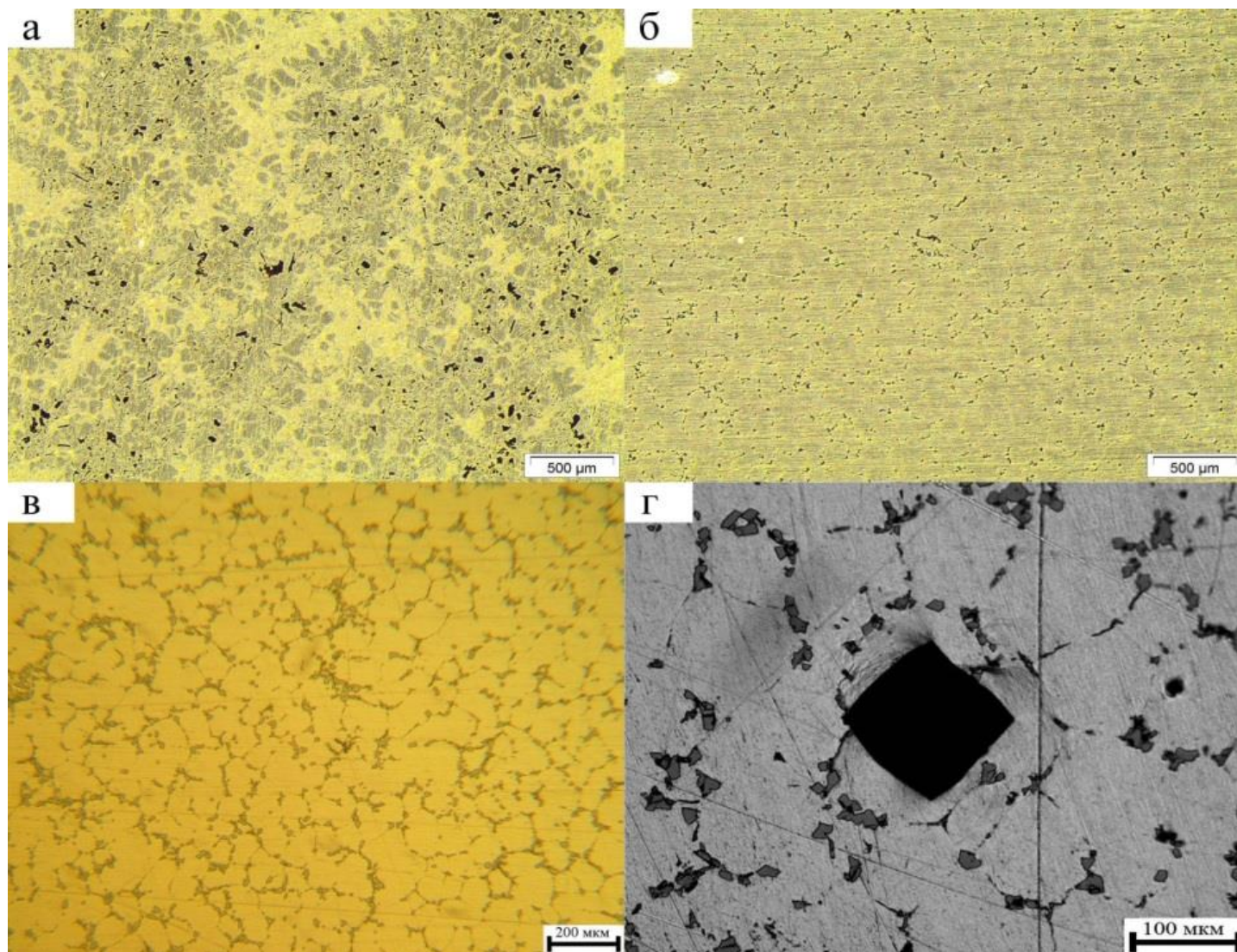
фактор формы частиц не является обязательным физически обоснованным требованием

# Схема и условия литья тиксозаготовки из поршневого сплава АЛ25 (Пат. РФ 2590432 С2)

# Тиксопрессованные точные заготовки поршня из сплава АЛ25

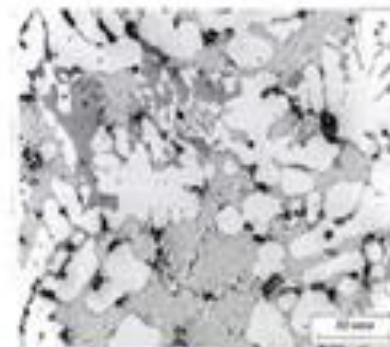


# Микроструктура сплава АЛ25 на различных стадиях литья

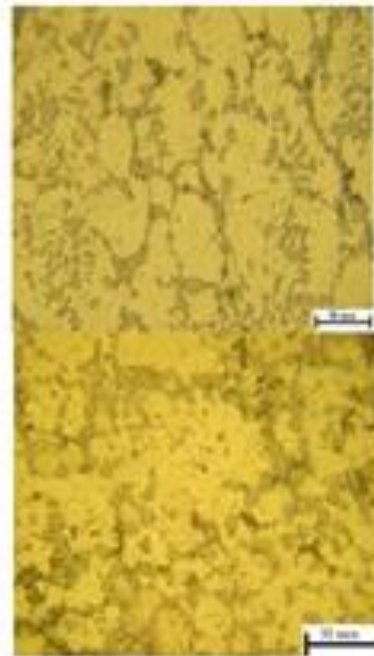




# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОРШНЕЙ ИЗ СПЛАВА АЛ25

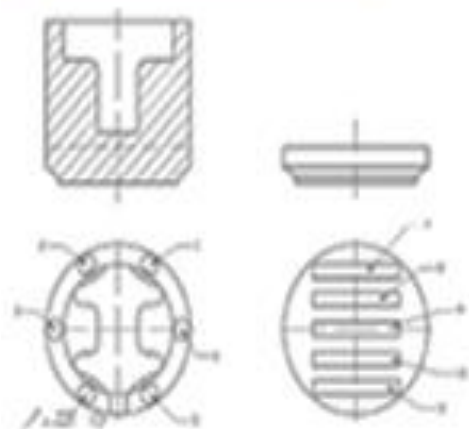


Литье  
в кокиль + Т6



Тиксо-  
штамповка

Тиксо-  
штамповка  
+ Т6



а)



б)

# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОРШНЕЙ ИЗ СПЛАВА АЛ25

Интервал затвердевания, условия литья и параметры структуры материала

Сплав	$T_L, ^\circ\text{C}$	$T_S, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$T_f, ^\circ\text{C}$	$T_q, ^\circ\text{C}$	$D_m, \text{MKM}$	$F_\alpha$
АЛ25 (336.0)	574	505	69	620	560	90.0	0.89

## Механические свойства сплава АЛ25 в детали «поршень»

№ п/п	Технология получения поршня, сплав АЛ25 Т6	Свойства			
		$\sigma_B, \text{MПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{MПа}$	$\delta, \%$	НВ
1	Литьё в кокиль, [9]	220	220	0,5	107
2	Жидкая штамповка ( $P = 150 \text{ MПа}$ ), [9]	250	240	0,85	120
3	Жидкая штамповка ( $P = 150 \text{ MПа}$ ) с последующей ГСО ( $T = 460^\circ \text{C}$ , $P = 180 \text{ MПа}$ , $t = 3 \text{ ч}$ ), [9]	310	290	1,2	121
4	Тиксоштампованная деталь	309	274	<b>6,83</b>	<b>150</b>

Фомина О.Н. Порошковая металлургия. Энциклопедия международных стандартов. Справочник, 2-издание. - М.: Протектор, 2015. - 384 с.

# Основные современные источники информации


INTERNATIONAL STANDARD ISO 22068

Sintered-metal injection-moulded materials — Specifications

Стандарты Американской национальной федерации порошковой металлургии (MPIF)


Номер стандарта	Наименование стандарта	
Стандарты на методы испытаний и классификацию		
Std. 01	Отбор проб металлических порошков	Metal powders sampling
Std. 02	Определение потери массы в восстановительной атмосфере для металлических порошков (водородные потери)	Determination of loss of mass in a reducing atmosphere for metal powders (hydrogen loss)
Std. 03	Определение расхода сыпучих металлических порошков с помощью аппарата Холла	Determination of flow rate of free-flowing metal powders using the Hall apparatus
Std. 04	Определение кажущейся плотности сыпучих металлических порошков с помощью аппарата Холла	Determination of apparent density of free-flowing metal powders using the Hall apparatus
Std. 05	Ситовый анализ металлических порошков	Sieve analysis of metal powders
Std. 50	Метод для подготовки и оценки спеченных/термообработанных металлических образцов, полученных инъекционным формованием, для испытаний под напряжением	Method for preparing and evaluating of metal injection molded (MIM) sintered/heat treated tension test specimens
Std. 59	Определение энергии удара по Шарпи испытательных образцов без надреза, полученных инъекционным формованием,	Determination of Charpy impact energy of unnotched metal injection molded (MIM) test specimens
Std. 62	Определение коррозионной стойкости нержавеющей стали полученной инъекционным формованием, в 2% растворе серной кислоты	Determination of corrosion resistance of MIM grades of stainless steel immersed in 2% sulfuric acid solution
Std. 63	Определение плотности компонентов из металлов, полученных инъекционным формованием (газовый пикнометр)	Density determination of metal injection molded (MIM) components (gas pycnometer)
Std. 64	Определение терминов, используемых в инъекционном формовании	Definition of terms used in metal injection molding (MIM)

Promoting Powder Metallurgy Technology

European powder metallurgy association 

## METAL INJECTION MOULDING

A Manufacturing Process for Precision Engineering Components



Process Properties & Testing Technical Guidelines MIM Design Case Studies

www.epma.com

4th International Conference on Semi-Solid Alloys and Composites


## CONFERENCE PROCEEDINGS

edited by DH Kirkwood

19-21 June 1996 The University of Sheffield

Proceedings of the 15th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites

## Advanced Semi-Solid Processing of Alloys and Composites



Edited by Y. Tsutsui, M. Kikuchi

S2P 2018

15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES

## Conference Manual


Southern University of Science and Technology

October 22nd - 24th, 2018 Shenzhen · China

FOR THE METAL, CERAMIC AND CARBIDE INJECTION MOULDING INDUSTRIES

# POWDER INJECTION MOULDING INTERNATIONAL

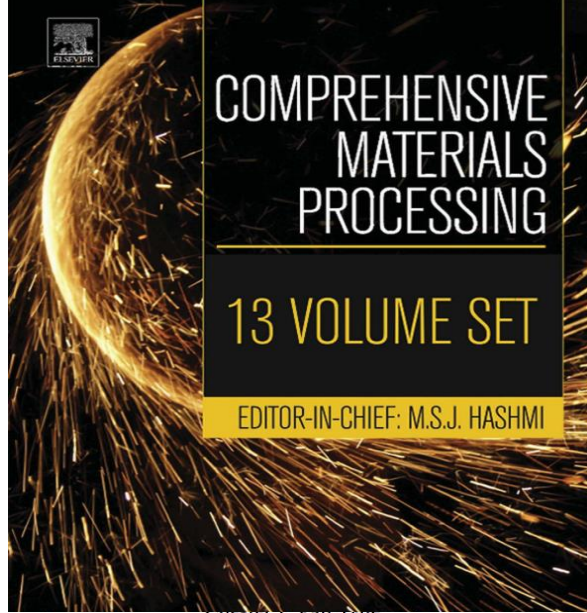
WOODHEAD PUBLISHING IN MATERIALS



## Handbook of metal injection molding

Edited by Donald F. Heaney

APP 2012 WP



# COMPREHENSIVE MATERIALS PROCESSING

## 13 VOLUME SET

EDITOR-IN-CHIEF: M.S.J. HASHMI

Shengxiang Yao, Editor  
Colorado School of Mines, Golden, CO, USA

Bekir Yilbas  
King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia

VOLUME 5  
CASTING, SEMI-SOLID FORMING AND HOT METAL FORMING

VOLUME EDITOR  
Joseph McGeough  
University of Edinburgh, Edinburgh, UK

2014

5.01 Introduction to Casting, Semi-Solid Forming and Hot Metal Forming, J A McGeough

**Введение в технологии литья, твердожидкого формования и горячей штамповки металлов**

5.02 Advanced Casting Methodologies: Inert Environment Vacuum Casting and Solidification, Die Casting, Compcasting, and Roll Casting, P Kapranos, D Brabazon, S P Midson, S Naher and T Haga

**Современные методы литья: ..... П. Капранос и др.**

5.03 Advanced Casting Methodologies: Investment Casting, Centrifugal Casting, Squeeze Casting, Metal Spinning, and Batch Casting, P Kapranos, C Carney, A Pola and M Jolly

**Современные методы литья: ..... П. Капранос и др.**

5.04 Rapid Solidification Processing and Bulk Metallic Glass Casting, S N Aqida, L H Shah, S Naher and D Brabazon

**Процессы, построенные на быстром затвердевании, литье деталей из металлических стекол**

5.05 Single-Crystal Casting/Directional Solidification, H Dong and H Dai

**Монокристалльные и направленно закристаллизованные отливки**

5.06 Semisolid Processes, G Govender, H Möller and O F R A Damm

**Технологии твердожидкой обработки**

5.07 Routes to Spheroidal Starting Material for Semisolid Metal Processing, A H Ahmad, S Naher, S N Aqida and D Brabazon

**Подготовка сфероидизируемых металлических материалов для переработки в твердожидком состоянии**

5.08 Rheology of Semisolid Metallic Alloys, H V Atkinson

**Реология твердожидких металлических сплавов**

5.09 Alloys for Semisolid Processing, E J Zoqui

**Сплавы для переработки в твердожидком состоянии**

5.10 Modeling of Semisolid Flow, V Favier

**Моделирование течения твердожидкого металла**

5.11 Tribology in Hot Forging, B-A Behrens, A Bouguecha, I Lыken, J Mielke and M Bistron

**Трибология в методах горячей штамповки**

5.12 Casting Simulation Methods, T S Prasanna Kumar

**Методы моделирования литейных процессов**

5.13 Industrial Practice and Applications, S P Midson

**Опыт промышленного использования и применения**

# Современная металлургия тиксотропных материалов

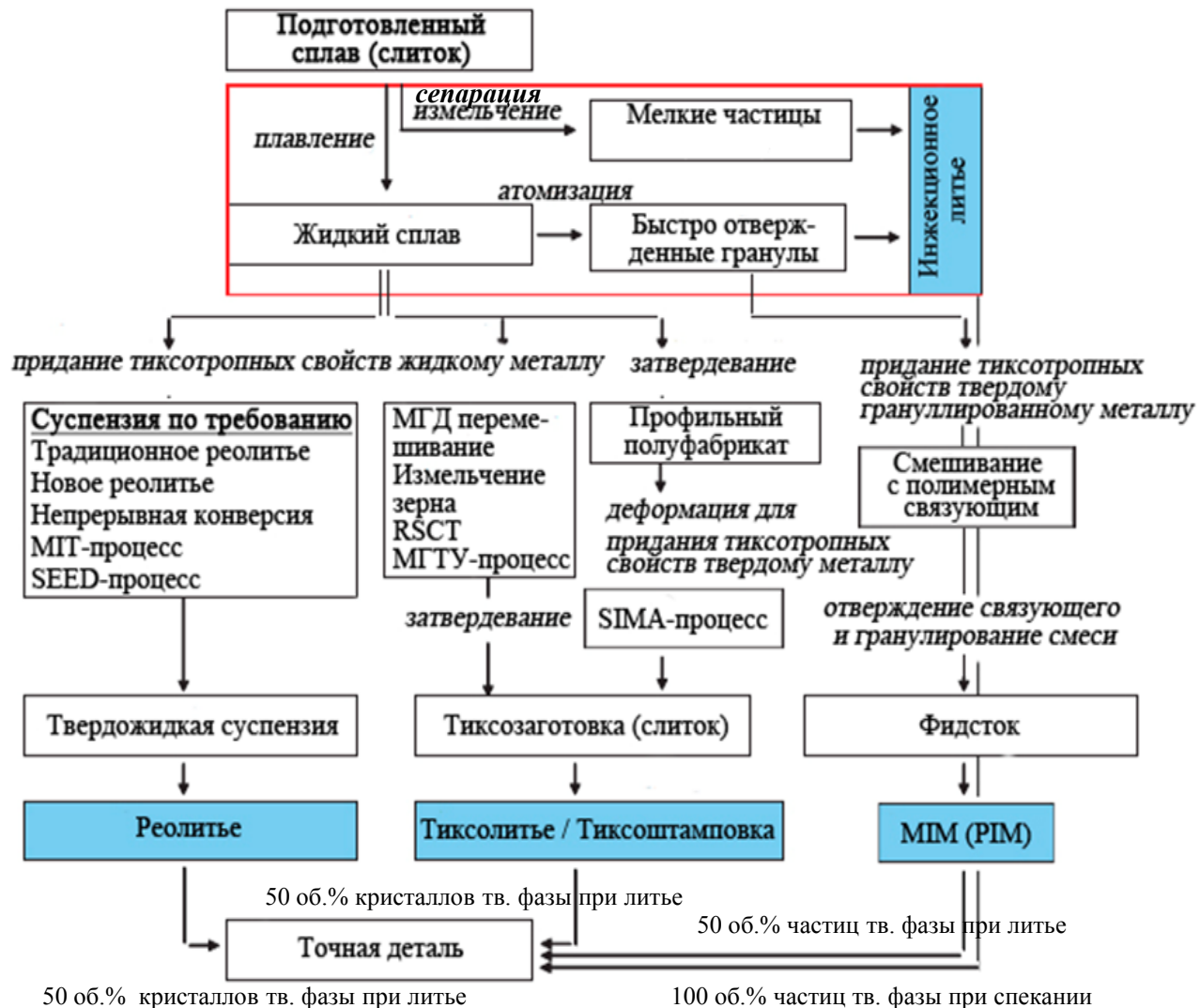
Материалу до начала формования детали придаются соответствующие назначению дополнительные (функциональные) свойства.

Функциональные свойства, - это релаксационная способность и текучесть под воздействием сдвиговой деформации, реализуемые на стадии литья.

Текучесть достигается предварительной подготовкой порции сплава путем придания материалу тиксотропных свойств

Формуемость достигается предварительной релаксацией подготовленной порции сплава на стадии заполнения формы

Исходное состояние материала:



Три источника обеспечения требуемой текучести:

Три составные части методов формования:

# ВЫВОДЫ

Организовать для внутреннего спроса замещение привозимых из-за рубежа готовых алюминиевых деталей и изделий автомобильной техники, изготавливаемых методами тиксо и реолитья из стандартизованных сплавов, до появления в России предприятий, способных организовать работу по схемам фирм SAG Motion GmbH, KinRui Hi-Tech Co. Ltd, RheoMetal Light Metal Co. Ltd и др., по-видимому, не возможно.

Развитие импортозамещения и экспорта литых изделий из алюминиевых сплавов требует совершенствования базовой материаловедческой подготовки инженеров-литейщиков в части изучения основ современных методов структурообразования отливок.

Современная общеинженерная и конструкторская подготовка специалистов машиностроительных специальностей требует изменений и должна строиться с учетом новой концепции функций и технологичности детали, в частности, с ориентацией на использование возможностей тиксо-, рео- и МПМ-технологий.