

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

д.т.н. А.А. Абрамов, к.т.н. М.Д. Тихомиров

ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт материалов»

В литературе нет устоявшегося мнения, с каким уровнем свойств необходимо относить литейные алюминиевые сплавы к категории высокопрочных. Из анализа уровня свойств алюминиевых сплавов в государственных и отраслевых стандартах, по нашему мнению, к высокопрочным можно относить литейные алюминиевые сплавы, имеющие временное сопротивление разрыву более 300 МПа (таблица 1). Здесь приведены коррозионностойкие свариваемые сплавы, разработанные ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт материалов», в сравнении с высокопрочным алюминиево-медным сплавом ВАЛ10 и наиболее применимым деформируемым сплавом Д16Т.

Типичные механические свойства алюминиевых литейных высокопрочных сплавов

Таблица 1

Марка сплава	Металлическая система	σ_{02} , МПа	σ_B , МПа	δ , %	НВ	КСУ, $\frac{КДж}{м^2}$	K_{1C} , $\frac{МН}{м^{3/2}}$	σ_{-1} , МПа
АЛ9М	Al-Si	250	340	3,0	100	80	18	65
АЛ27	Al-Mg	190	360	18	90	150	65	55
АЛ24П	Al-Mg-Zn	372	460	6,0	140	100	24	51
АЛ23-3	Al-Mg-Li	277	380	4,0	121	25	22	51
ВАЛ10	Al-Cu	390	500	4,0	120	100	20	70
Д16Т	Al-Cu-Mg	300	440	20,0	130	250	44	120

Если такие свойства высокопрочных литейных сплавов как временное сопротивление разрыву (σ_B), предел текучести (σ_{02}), твердость (НВ) мало отличаются от аналогичных свойств деформируемых сплавов, то свойства, определяющие надежность изделия или детали – пластичность (δ), ударная вязкость (КСУ), предел усталости (σ_{-1}) – существенно ниже у литейных сплавов и это объясняет, почему конструкторы в ответственных узлах предпочитают использовать деформируемые сплавы.

В то же время, всегда есть большая номенклатура деталей, которые изготовить возможно только методами литья, поэтому литейные материалы и технологии и в настоящее время и в обозримом будущем будут достаточно востребованными.

Приготовление качественных алюминиевых сплавов предполагает безусловное выполнения ряда условий, обеспечивающих ограниченное содержание металлических (прежде всего, железа) и неметаллических (водорода и оксида алюминия) примесей, а также обработку расплава с целью получения заданной структуры сплава в твердом состоянии.

Примесь железа (а для сплавов на основе систем Al-Mg и Al-Cu также примесь кремния) существенно снижает, прежде всего, пластичность и ударную вязкость сплавов (рис. 1). Для ограничения примеси железа необходимо в шихте использовать алюминий высоких марок (не ниже А8), а также ограничить применение железного литейного инструмента. Использование в плавильных и раздаточных печах чугунных тиглей недопустимо.

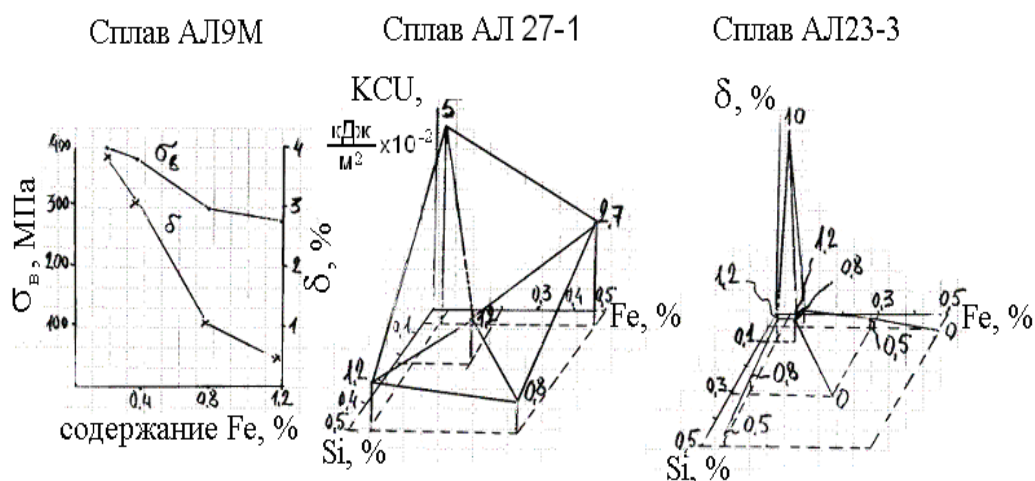


Рис.1 Влияние примесей железа (и кремния для сплавов типа твердого раствора) на свойства алюминиевых сплавов

Примеси водорода и оксида алюминия, попадая в сплавы в основном из влаги в шихте, из атмосферы пламенных печей, из влаги воздуха, приводят к снижению всех механических свойств (табл. 2).

Технологических приемов, снижающих содержание примесей водорода и оксида достаточно много, но для литейных алюминиевых сплавов, по нашему мнению, наиболее эффективной и простой является обработка расплава препаратами «Дегазер» или «Дегазал 200» в виде таблеток (табл. 3).

Влияние водорода на свойства алюминиевых сплавов

Таблица 2

Марка сплава	Содержание водорода, см ³ /100г	Механические свойства		
		Прочность, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, КДж/м ²
АЛ9М	0,18	282	4,3	25
	0,05	350	7,1	40
АЛ27	0,46	330	15,8	250
	0,25	390	28,3	600
АЛ24П	0,40	380	4,5	70
	0,10	465	8,0	110

Сравнительная эффективность технологий рафинирования

Таблица 3

Технология	Остаточное содержание, % от начального	
	Водород	Оксид алюминия
Вакуумирование	38	72
«Дегазер» («Дегазал 200»)	12	31

Для получения высоких механических свойств в отливках, кроме минимальной концентрации примесей, необходимо также обеспечить требуемую структуру металла. Для сплавов на основе системы алюминий-кремний – это модифицирование кремния в эвтектике. По нашему мнению, наиболее эффективным модификатором с точки зрения как технической, так и экономической является стронций в виде лигатура алюминий – 5% стронция (рис. 2).

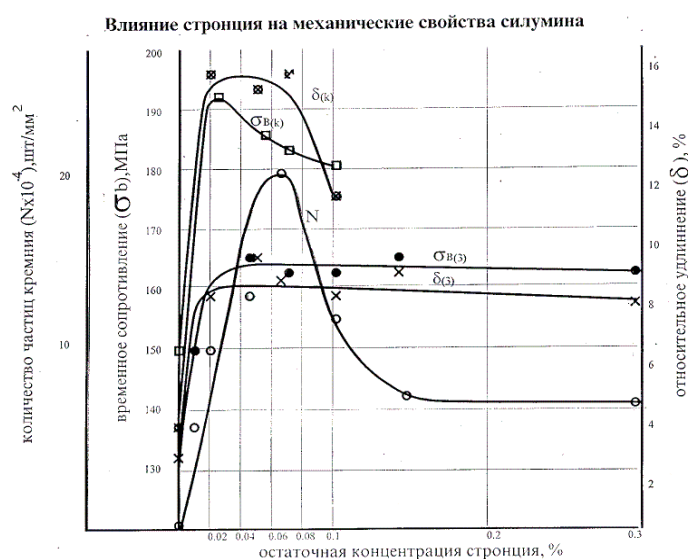


Рис. 2 Влияние стронция на механические свойства эвтектического силумина (индекс «к» - литые в металлическую форму, индекс «з» - литые в песчаную форму)

Для сплавов типа твердого раствора металлических систем алюминий-медь, алюминий-магний, алюминий-магний-цинк, алюминий-магний-литий для получения мелкого литого зерна (соответственно, высоких механических свойств) необходимо проводить модифицирование тройной лигатурой алюминий-титан-бор. Эффективность тройной лигатуры может быть наглядно продемонстрирована при модифицировании чистого алюминия (табл. 4).

Эффективность различных модификаторов

Таблица 4

	Способ модифицирования	Размер литого зерна, мкм
Алюминий марки А99 (сумма примесей не более 0,01%)	Без модифицирования	970
	Двойная лигатура Al+5%Ti	155
	Al+5%Ti+1%B	104

Только выполнение всех перечисленных выше технологических приемов дает возможность обеспечить уровень механических свойств литейных алюминиевых сплавов, приведенный в таблице 1.

Известны попытки получения сплавов с еще большим уровнем, прежде всего, прочности. Однако при этом не удастся обеспечить приемлемый уровень пластичности и ударной вязкости сплавов. Кроме того, все высокопрочные сплавы типа твердого раствора имеют невысокие технологические свойства (табл. 5) – жидкотекучесть и трещиностойчивость (склонность к образованию трещин при кристаллизации), поэтому получить фасонные заготовки литьем в неподатливую разовую или в металлическую форму весьма затруднительно.

Оценка технологичности высокопрочных алюминиевых сплавов

Таблица 5

Сплав	Жидкотекучесть*	Трещиностойчивость	Коррозионная стойкость	Жаропрочность
АЛ9М	++	++	+	+
АЛ27	+	+	++	—
АЛ24П	—	—	+	—
АЛ23-3	+	—	+	—
ВАЛ10	—	—	—	++

* (++) очень хорошая, (+) хорошая, (—) плохая

В этой связи перспективными являются три направления:

- широкое применение холодильников при литье в разовую форму;
- литье с кристаллизацией под поршневым давлением (жидкая штамповка);
- компьютерное моделирование процесса формирования отливки в форме еще на стадии проектирования детали.

Холодильники

Холодильники давно и широко применяются при литье алюминиевых сплавов, в том числе при литье высокопрочных сплавов, так как высокие свойства их, как правило, обеспечиваются высокой скоростью охлаждения при кристаллизации. Холодильники могут быть чугунными, стальными, медными, графитовыми в зависимости от требованию по скорости охлаждения в зоне действия холодильника. По результатам наших исследований (...), особенно эффективны холодильники при литье способом вакуум-пленочной формовки, когда за счет вакуума в форме литейная корочка прижимается в поверхности холодильника, что обеспечивает скорость охлаждения в зоне холодильника в восемь раз большую, чем без вакуума (табл. 6), мелкую структуру металла и высокие механические свойства.

Параметры процесса затвердевания алюминиевого сплава на чугунном холодильнике

Таблица 6

Характеристика процесса	Вакуум-пленочная формовка	Песчано-глинистая форма
Относительная площадь плотного контакта	0,44	0,01
Средний по неконтактной площади воздушный зазор, мм	0,07	0,14
Время затвердевания бесконечной плиты толщиной 50 мм, мин	1,5	12

Литье с кристаллизацией под давлением

Литье с кристаллизацией под давлением (ЛКД) дает возможность не только компенсировать усадку за счет перемещения пуансона в процессе затвердевания отливки, но и получить высокие как прочностные свойства, так и характеристики надежности (относительное удлинение, ударную вязкость, вязкость разрушения), близкие к деформируемым сплавам (табл. 7).

Свойства высокопрочных алюминиевых сплавов при литье в металлическую форму
Таблица 7

Сплав	Способ литья	Механические свойства					
		σ_{02} , МПа	σ_B , МПа	δ , %	КСУ, КДж/м ²	K _{1C} , МН/м ^{3/2}	НВ
АЛ24П	кокиль	328	425	7,1	69	44,4	121
	ЛКД (ЖШ)	315	435	12,0	290	66,2	121
АЛ23-3	кокиль	262	388	5,1	30,3	70	107
	ЛКД (ЖШ)	234	425	19,3	250	98	107

Конечно, способом литья с кристаллизацией под давлением можно изготавливать ограниченную номенклатуру отливок, однако, при использовании в процессе отработки чертежа отливки и режимов литья компьютерного моделирования этим способом могут быть получены достаточно сложные отливки (фото 1).



Фото 1. Отливки, изготовленные способом литья с кристаллизацией под давлением. Слева – сплав ВАЛ10 (Al-Cu), справа – сплав АЛ23-3 (Al-Mg-Li)

Способ литья с кристаллизацией под давлением может успешно быть использован для получения композиционных отливок (1). В качестве примера можно привести поршень с доньшком из композиционного материал пористый карбид титана – алюминиевый сплав. Технология включает в себя следующие этапы:

- изготовление пористой заготовки из карбида титана с размером пор 1-10 мкм (рис. 3а);

- пропитка пористой заготовки алюминиевым сплавом в вакууме при температуре $1000-1200^{\circ}\text{C}$ (рис. 3б);

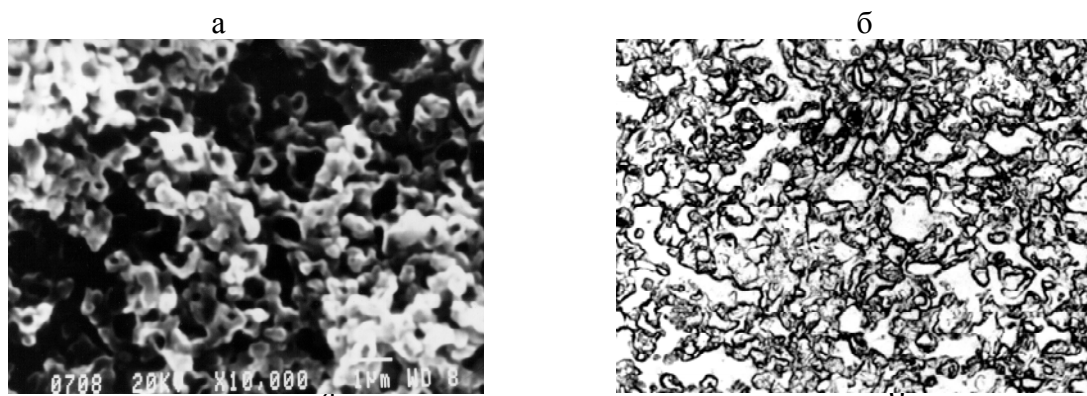


Рис. 3 Структура пористого карбида титана до (а) и после (б) пропитки

- компьютерное моделирование режима литья (рис. 4);
- установка композиционной заготовки доньшка поршня в матрицу при температуре 700°C (алюминиевый сплав в порах жидкий);
- заливка в матрицу поршневого сплава и прессование отливки.



Рис. 4. Температурно-временной режим процесса литья с кристаллизацией под давлением (компьютерное моделирование).

Механические свойства композиционного материала карбид титана – алюминиевый сплав при высокой температуре существенно выше, чем у стандартных поршневых алюминиевых сплавов (табл. 8)

По описанной выше технологии были изготовлены поршни двухтактного двигателя внутреннего сгорания (фото 2).

Механические свойства композиционного материала

Таблица 8

Материал Свойства	Температура, °C	АЛ25 (Al+12%Si)	АК18 (Al+18%Si)	TiC-(Al+12%Si)
Плотность, г/м ³	20	2700	2680	3800
ТКЛР; ×10 ⁻⁶ К ⁻¹	30-300	22	19	12,5
Модуль нормальной упругости, ГПа	200	76	80	176
	300	73	77	171
	400	67	71	165
	500	—	—	165
Прочность на изгиб, МПа	200	290	350	370
	300	130	180	360
	400	20	70	310
	500	—	—	152
Твердость НВ, МПа	200	60	65	175
	300	25	35	140
	400	—	—	110
Деформация в упругой области, %	200	0,38	0,44	0,21
	300	0,18	0,23	0,21
	400	0,03	0,10	0,19
	500	—	—	0,10

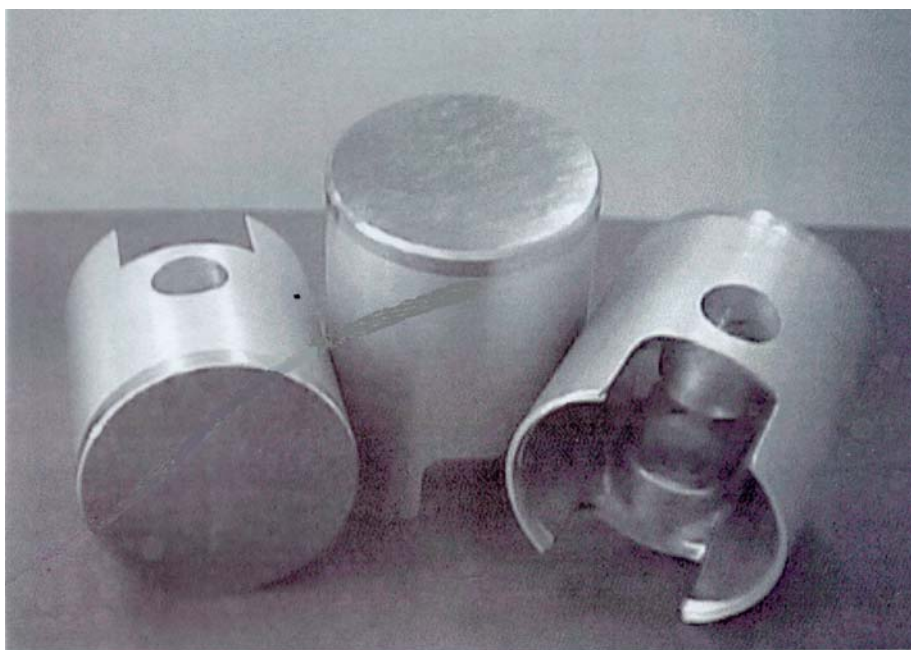


Фото 2. Композиционные поршни с доньшком из композита карбид титана – алюминиевый сплав

Компьютерное моделирование

Как уже указывалось выше, для получения устойчивых бездефектных литейных технологий для отливок из высокопрочных алюминиевых сплавов весьма желательно использовать компьютерное моделирование физических процессов, происходящих при формировании отливки. Это связано с тем, что многие высокопрочные алюминиевые сплавы обладают низкой технологичностью – склонны к появлению усадочных дефектов, кристаллизационных трещин и т.п. Кроме того, для получения высокого уровня механических свойств достаточно часто приходится использовать различные специальные способы литья, обеспечивающие высокую скорость охлаждения при кристаллизации (литье в кокиль, литье под низким давлением и т.п.), что существенно ужесточает процесс формирования отливки и выдвигает повышенные требования к литейной технологии. Компьютерное моделирование дает возможность наблюдать заполнение литейной формы металлом, охлаждение и затвердевание отливки, формирование тепловых узлов и усадочных дефектов, выявлять места затрудненной усадки, где возможно образование трещин при кристаллизации, прогнозировать механические свойства в различных местах отливки.

В настоящее время в России наиболее применяемой моделирующей системой является система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «ПолигонСофт», как наиболее адекватная с точки зрения физических моделей и математических алгоритмов [2,3]. Различные версии «ПолигонСофт» приобрело более 50 промышленных предприятий. В первую очередь это предприятия оборонно-промышленного комплекса и автопрома: ФГУП «Салют», ФГУП «УКВЗ», ОАО «Сатурн», ОАО «Красный Октябрь», ФГУП «Воткинский Машиностроительный Завод», ОАО «АвтоВАЗ», ОАО «УАЗ», ОАО «УМЗ» и др. Кроме того, более десятка лицензий «ПолигонСофт» приобрели исследовательские и учебные институты: Петербургский Институт Машиностроения, Петербургский СЗТУ, ГТУ им. Баумана, МИСиС, МАМИ, Комсомольский ГТУ, Самарский ГТУ, Воронежский ГТУ и др.

В качестве примеров применения СКМ ЛП «ПолигонСофт» для отработки литейных технологий отливок из алюминиевых сплавов можно привести моделирование различных аспектов технологий отливок ОАО «АвтоВАЗ» и ОАО «Звезда».

На рис. 5 показаны некоторые стадии расчета заполнения отливки из алюминиевого сплава, отливаемой методом ЛПД. В процессе расчета совместно решается гидродинамическая и тепловая задачи с учетом торможения потока при

нарастании доли твердой фазы (если затвердевание начинается в процессе заполнения). Моделирование процесса заполнения позволяет определить насколько правильно выбраны те параметры технологии, которые определяют последовательность заполнения, поля скоростей и поля температур в движущемся расплаве при заполнении. К таким параметрам относятся: конфигурация литниковой системы, температура заливки, начальное распределение температур в пресс-форме, скорость выпуска металла и т.д. Моделирование заполнения помогает на этапе проектирования избежать нежелательных режимов заполнения, предотвратить «неслитины», «спаи» и т.п. дефекты.

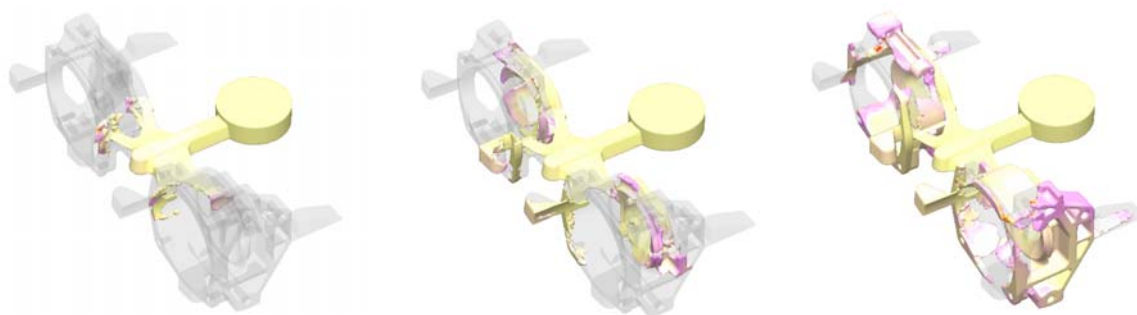
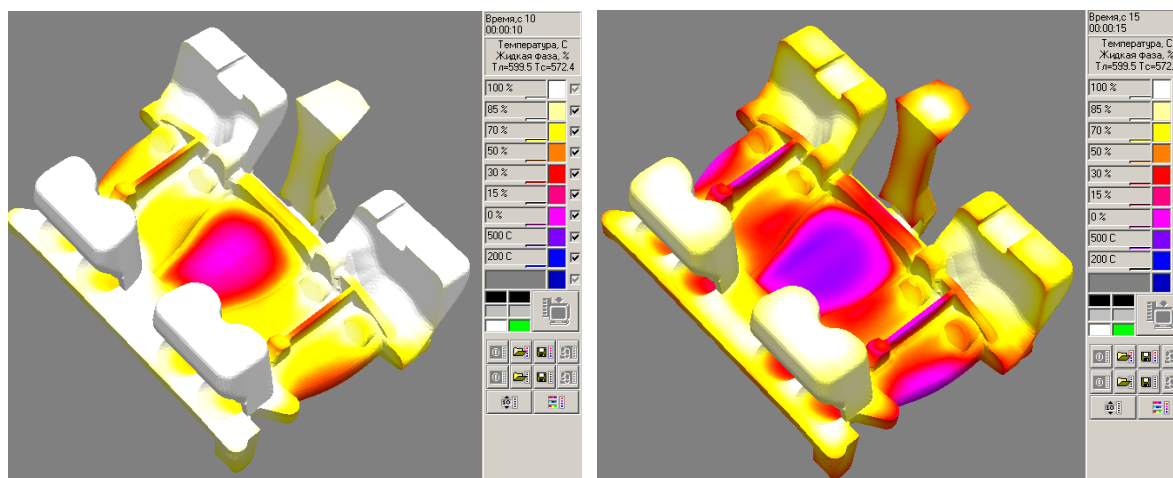


Рис.5 Заполнение пресс-формы расплавом при ЛПД

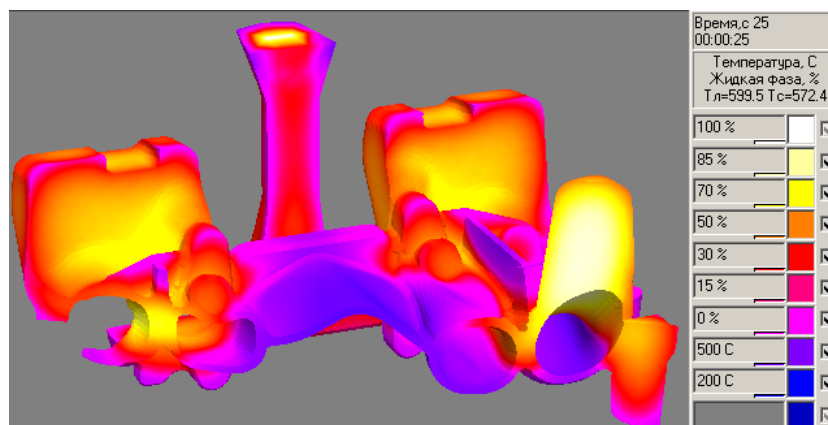
Большинство литейных дефектов формируется в процессе затвердевания отливки после полного заполнения. Соответственно расчет процессов образования усадочных дефектов, прогноз структурных параметров, механических свойств и т.п. связан с совмещенным решением тепловой задачи и задачи образования данного дефекта. Совмещенный расчет предполагает учет взаимного влияния процесса образования дефекта и теплового процесса друг на друга. Однако, достаточно часто, именно кинетика затвердевания и тепловые поля определяют ход совместного процесса, а не наоборот. В связи с этим важным этапом проектирования технологии является не только анализ конечного результата, но и анализ тепловых полей в процессе затвердевания. На рис. 6 показаны различные стадии затвердевания отливки «Труба впускная» из сплава АК9Т (типа А356), отливаемую в кокиль на ОАО «АвтоВАЗ». (Моделирование проводилось специалистами ОАО «АвтоВАЗ»)

Как видно по тепловым полям, в первую очередь происходит затвердевание перемычки между вторым и третьим газовыми каналами и, далее, сами газовые каналы. В последнюю очередь затвердевают фланцы. По рис.6, г видно, что во фланцевой части

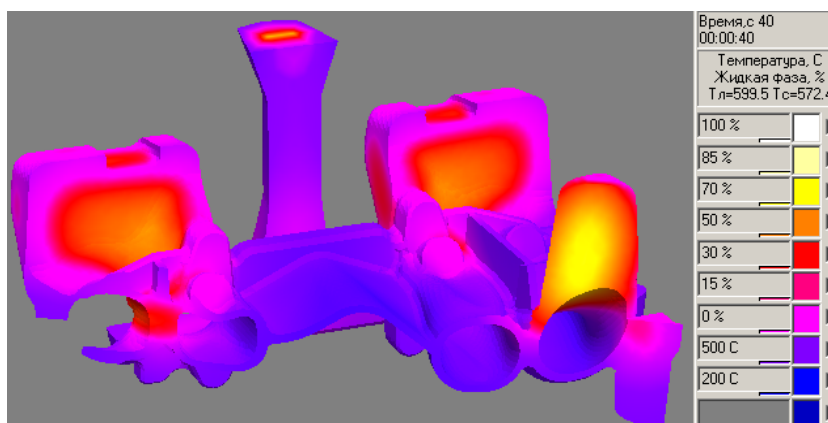
отливки образуется тепловой узел, в котором возможно образование усадочных дефектов.



а) 10 секунд после заполнения формы б) 15 секунд после заполнения формы



в) 25 секунд после заполнения формы



г) 40 секунд после заполнения формы

Рис. 6 Температурно-фазовые поля при затвердевании.

На рис.7 показаны поля пористости, которые формируются при показанной выше кинетике затвердевания. По результатам расчета пористости видно, что в отливке образуется значительная по объему пористость (рис. 7). Она присутствует на

фланцевой части отливки при значениях изоповерхности более 50% (рис. 7). Это указывает на то, что в этой области есть высокая вероятность образования усадочных дефектов.

На основе анализа данных тепловых полей и полей пористости был сделан вывод о необходимости дополнительного питания данного места: прибыль, находящуюся над данным местом, нужно увеличить в направлении выступа на фланце и уменьшить знаковую часть стержня.

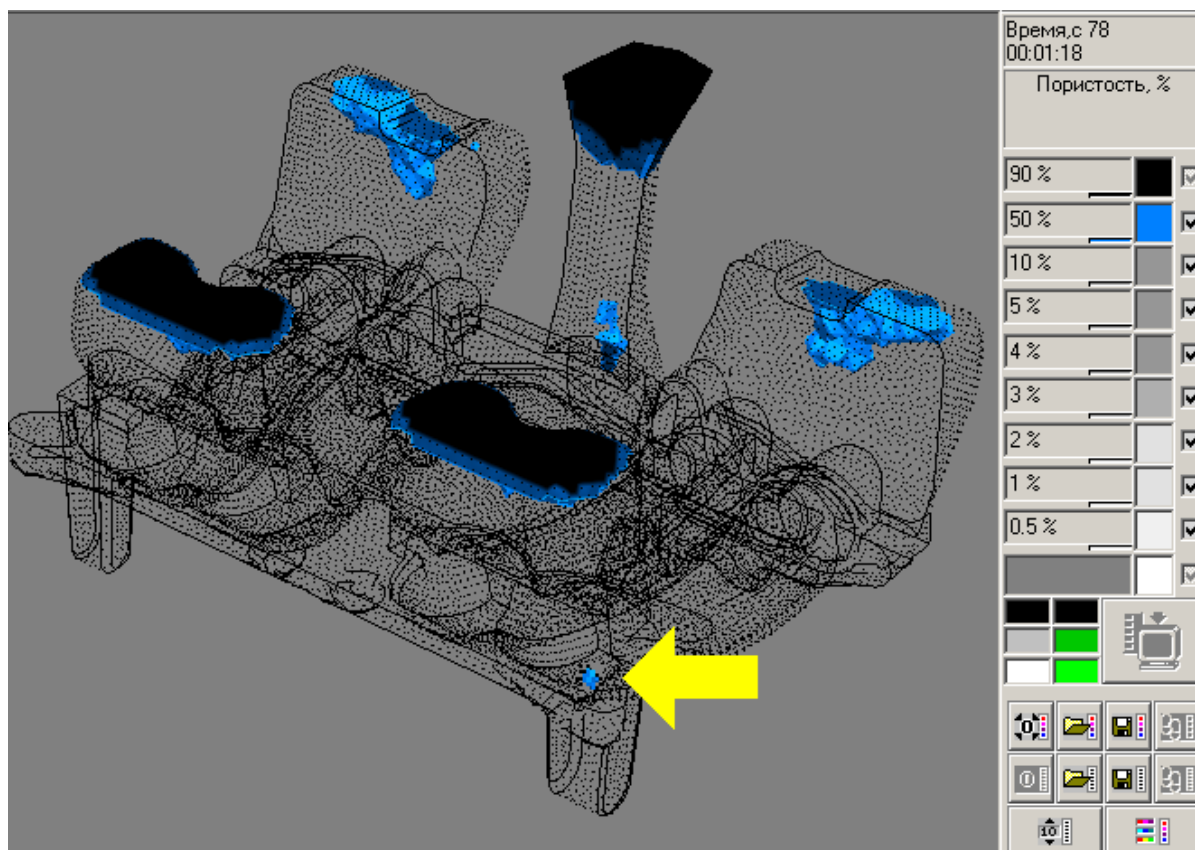


Рис.7 Поля пористости, показанные в виде областей, которые имеют пористость 50% и более (область значительных рыхлот и концентрированных раковин)

Помимо всего прочего, СКМ ЛП «ПолигонСофт» позволяет прогнозировать также и механические свойства в отливках. В качестве примера подобной работы можно привести некоторые результаты комплексного анализа и оптимизации литейной технологии для блока цилиндров судового двигателя (рис.8), отливаемого на ОАО «Звезда». (Моделирование по заказу завода проводили специалисты ООО «Фоундрикад».)

Отливка «Моноблок» изготавливается из алюминиевого сплава марки АК9ч (типа А356) методом автоклавного литья в песчано-жидкостекольную форму с чугунными холодильниками. Затвердевание отливки «Моноблок» протекает в

автоклаве при давлении 5 атм., что учитывалось при моделировании и, как показали сравнительные расчеты, достаточно эффективно влияет на предотвращение развитой микропористости [4].

Прогноз механических свойств в отливке осуществлялся средствами встроенного в «ПолигонСофт» модуля критериального анализа [6], предназначенного для обработки расчетных полей, полученных при моделировании литейной технологии.

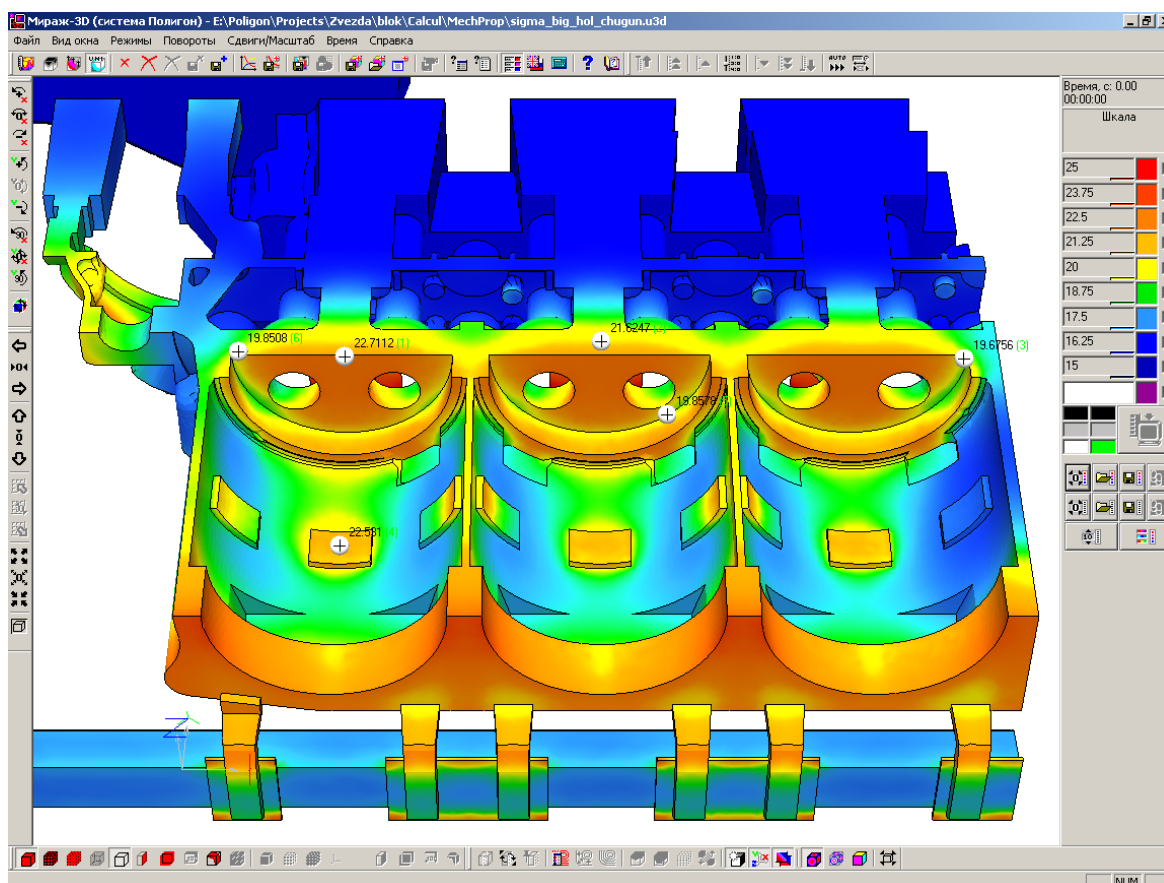


Рис. 8. Распределение полей прочности в отливке «Моноблок».

Для обеспечения высокого уровня механических свойств необходимо повышать скорость охлаждения отливки. Были исследованы пути обеспечения необходимого уровня свойств за счет небольших корректировок в технологии. Было показано, что лишь трехкратное увеличение толщины холодильника позволит настолько повысить скорость охлаждения в зоне дна камеры сжатия, что в ней будет гарантировано обеспечиваться требуемый уровень свойств (рис. 8).

Приведенные примеры демонстрирует широкие возможности компьютерного моделирования, в частности средствами СКМ ЛП «Полигон», для поиска условий получения отливок с заданным уровнем качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов А.А., Гордеев С.К., Денисов Л.Ю. Локальное упрочнение отливок из алюминиевых сплавов каркасными композитами. «Литейное производство», № 5, 2002, с. 8-12.
2. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Тепловая задача. //Литейное производство, 1998, № 4, с. 30-34.
3. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Усадочная задача. //Приложение к журналу Литейное производство, 2001, № 12, с. 8-14.
4. Тихомиров М.Д., Комаров И.А. Основы моделирования литейных процессов. Что лучше – метод конечных элементов или метод конечных разностей. //Литейное производство, 2002, № 5, с. 22-28.
5. Бройтман О.А., Тихомиров М.Д. Система компьютерного моделирования литейных процессов ПОЛИГОН. //Сб. Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности. Материалы научно-практического семинара. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004, с. 29-36.
6. Бройтман О.А. Критериальный анализ в САМ ЛП ПОЛИГОН. //Сб. Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности. Материалы II научно-практического семинара. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005, с. 17-22.