

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ С КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

М.С. Денисов, Г.А. Котов, С.М. Петухова (ВлГУ им А.Г. и Н.Г. Столетовых)

Представлены результаты и возможности компьютерного моделирования, используемого для обоснования технологических режимов обработки кристаллизующегося металла давлением. Сравниваются результаты моделирования в программном комплексе ProCast, с результатами, полученными экспериментальным путем. Исследования проводятся на гидравлическом прессе. В качестве исследуемой отливки используется заготовка поршня ДВС, габаритные размеры которого: диаметр 90 мм, высота 70 мм. Разработанный подход позволяет выбрать наиболее оптимальные технологические режимы обработки, что сокращает время на подготовку к производству и отладку оборудования, а также дает возможность прогнозировать литейные дефекты¹.

Ключевые слова: 3D-моделирование, кристаллизация под давлением, алюминиевый сплав, пресс-форма, макро- и микропористость.

Введение

В промышленности использование сплавов на основе алюминия для производства деталей и узлов становится все более приоритетным. Авиационная и автомобильная промышленность использует детали из алюминиевых сплавов с целью уменьшения массы конечных изделий и повышения коррозионной стойкости. В зависимости от предъявляемых требований для производства деталей применяются различные технологии обработки металлов и сплавов, в том числе технологии литья: литье в кокиль, литье под давлением, литье по выплавляемым моделям и др. На сегодняшний день разработаны модели и алгоритмы, позволяющие прогнозировать отдельные свойства готовой металлопродукции. Данными проблемами занимаются Селиванов А.А., Прудников А.Н., Афанасьев В.К., Бланк В.Д., Калинин Б.А. и др. Но до сих пор в литейной промышленности остались не решенными проблемы получения изделий с плотной структурой, распределенной равномерно во всем объеме заготовки.

Описание объекта автоматизации

В работе ставится задача повышения эффективности технологической подготовки производства при выпуске деталей методом литья с кристаллизацией под давлением с различной массой и габаритными размерами. Критерии эффективности - кратчайшие сроки выпуска и минимальные затраты ресурсов.

На сегодняшний день в промышленности с использованием компьютерной графики моделируются процессы литья под давлением, в которых используется один прессующий плунжер, предназначенный только для заполнения пресс-формы.

В представленной работе приводится компьютерное моделирование технологического процесса литья с кристаллизацией под давлением, где наложение давления осуществляется двумя прессующими плунжерами, движущимися друг навстречу другу (рис. 1).

Научная новизна заключается в предлагаемом подходе автоматизации процесса обработки кристаллизующегося металла давлением. Переход металла из жидкого состояния в закристаллизовавшееся осуществляется в условиях управления накладываемым давлением. При этом изменяется расстояние между атомами, формируется кристаллическая решетка, близкая к той, которая соответствует твердому состоянию.

До наложения давления расплав в пресс-форму заливается с перегревом, а скорость наложения давления и охлаждение металла приводят к такому взаимному соответствию, при котором давление во всем объеме распределяется равномерно. При этом величина давления достаточна для опрессовки расплава до такой степени, чтобы время равномерной кристаллизации было больше отрезка времени, необходимого для перехода из жидкого состояния в твердое без образования кристаллов.

Компьютерное моделирование предложенного процесса в программной среде до настоящего времени не осуществлялось. В работе экспериментально подтверждается сходимость результатов, полученных эмпирическим путем с результатами, полученными компьютерным моделированием.

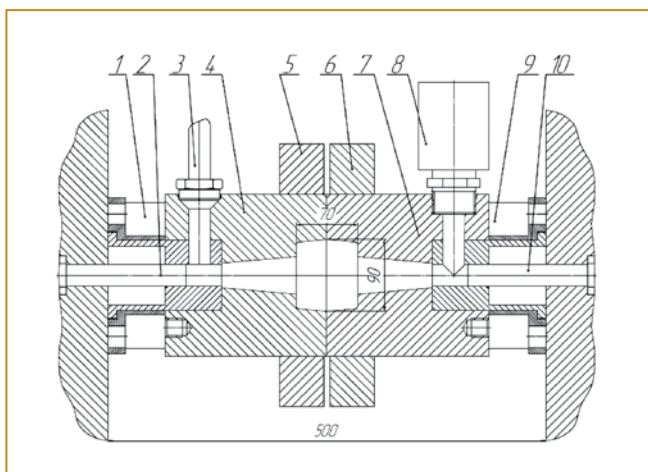


Рис. 1. Графическая схема используемой оснастки, где 1-левая матрица; 2-левый прессующий плунжер; 3-вакуумный штуцер; 4-подвижная полуформа; 5,6-бандаж; 7-неподвижная полуформа; 8-заливочная чаша; 9-правая матрица; 10-правый прессующий плунжер

¹ Работа выполнена частично на средства: гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (номер гранта — МК-181.2021.4); гранта по программе поддержки талантливой молодежи «Умник» (проект №15437ГУ/2020).

Моделирование процессов литья заготовки поршня с кристаллизацией под давлением

Рассмотрим процесс литья на горизонтальном гидравлическом прессе с кристаллизацией под давлением. Величина давления, накладываемого на металл, составляет 500 МПа. Такое давление способно не только компенсировать усадку, но и обеспечить формирование плотной, равномерной структуры отливки во всем объеме, что подтверждается предварительными исследованиями [1].

Однако для каждой конкретной отливки или номенклатуры деталей требуется свой, индивидуальный технологический режим обработки. В данном случае, под технологическим режимом обработки подразумеваются совокупность входных параметров технологического процесса, к которым относятся: температура металла, температура формы, скорость и величина накладываемого давления.

С развитием цифровых технологий появляется возможность на стадии проектирования технологического процесса, системы управления оборудованием, а также оснастки и самой детали спрогнозировать и устранить возможные причины брака в производстве. Для этого используются современные методы компьютерного моделирования технологических процессов [2].

В работе представлены результаты компьютерного моделирования процесса опрессовки алюминиевого сплава с целью получения заготовки для поршня двигателя внутреннего сгорания. Опрессовка представляет собой процесс литья с кристаллизацией под давлением. Схема оснастки, используемой для реализации технологии литья с кристаллизацией под давлением, представлена на рис.1.

Процесс протекает в следующей последовательности: в исходном положении перед началом циклов правый прессующий плунжер (10) установлен справа от вертикального отверстия заливочной чаши (8) так, чтобы расплавленный металл беспрепятственно протекал в полость формы. После прогрева газовым пламенем в раскрытом состоянии внутренней и внешней поверхности формы до температуры 150 ± 10 °С с помощью пульверизатора наносят слой графитосодержащей краски. Перемещением подвижной полуформы (4) левую матрицу (1) смыкают с правой матрицей (9). Усилие смыкания между подвижной полуформой и неподвижной полуформой (7) превышает усилие, возникающее при опрессовке кристаллизующегося металла давлением. Левый прессующий плунжер (1) в начальном положении перекрывает отверстие вакуумного штуцера (2) на $\frac{3}{4}$, что соответствует эффективному вакуумированию пресс-формы. Опрессовка металла осуществляется в форме между движущимися друг навстречу другу прессующими плунжерами. После опрессовки и выдержки под давлением заготовка цилиндрической формы $\varnothing 90 \times 70$ мм извлекается из пресс-формы [3].

Для получения качественной заготовки без литейных дефектов, с высокими физико-механическими свойствами ставится задача: провести моделирование и

проанализировать влияние характера накладываемого давления на расплавленный металл во время кристаллизации. Для моделирования процесса заливки и опрессовки алюминиевого сплава используется программа ProCast с модулем APM (Advanced Porosity Module -параметры расчеты макро- и микропористости) [4].

Для проведения исследований выбран алюминиевый сплав АК12. В начале работы построена компьютерная модель в 3D визуализаторе, повторяющая геометрию оснастки. Твердотельная модель передается в модуль ProCast VisualMesh, где на ее основе строится конечно-элементная сетка (рис.2).

В формообразующей полости пресс-формы отливка располагается в центральной части по полости разъема и занимает примерно 70% всего объема формы. Для эффективного заполнения пресс-формы необходимо 2 кг металла; время заполнения формы ≤ 5 с. В граничных условиях указывается скорость потока металла, которая высчитывается с использованием функций программы, исходя из введенных значений. В соответствии с рекомендациями программного продукта, скорость заполнения металлом пресс-формы должна соответствовать значению 360,8 мм/с.

Для оценки влияния таких факторов, как температура заливки металла, время остывания заготовки в пресс-форме, образование твердой фазы, температура формы, образование макро- и микропористости, а также величина давлением и время выдержки под давлением на качество получаемой заготовки выполнялся анализ с помощью модулей Flow и Thermal совместно с модулем APM.

В ProCast модуль Flow отвечает за характер течения металла, появление воздушных карманов, засо-

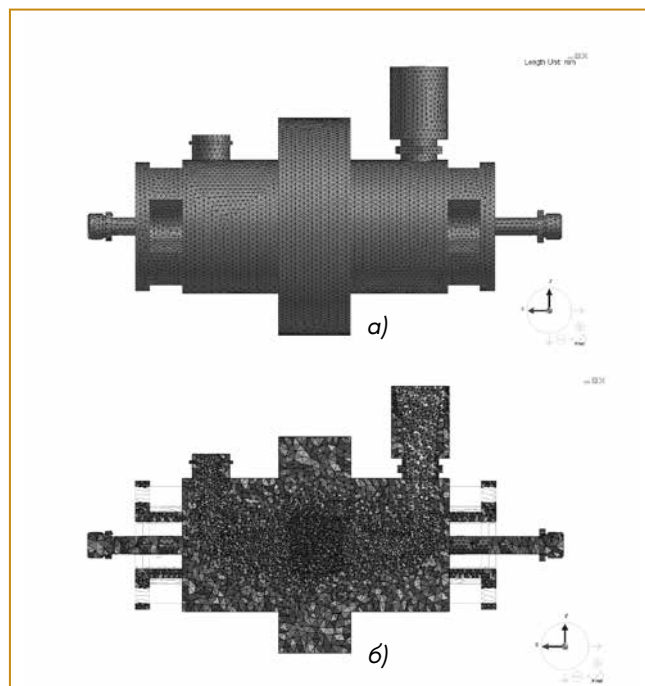
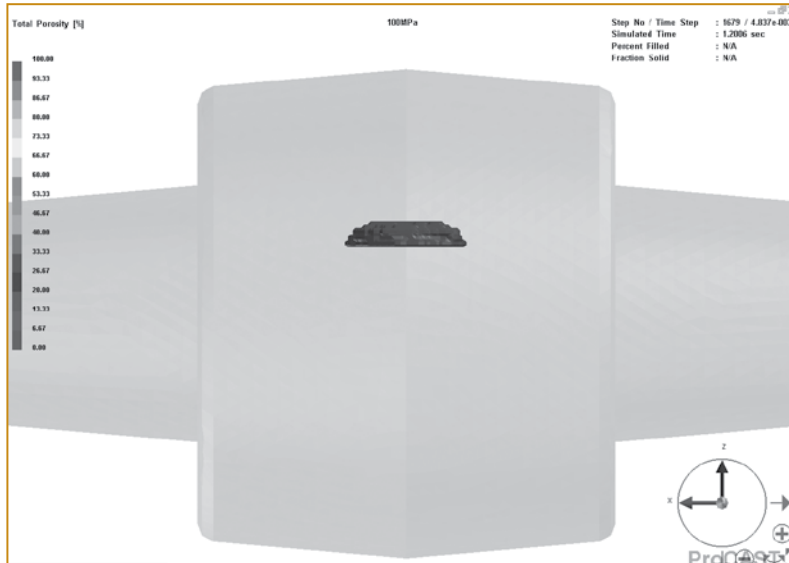


Рис. 2. Конечно-элементная сетка оснастки: а) на поверхности; б) в объеме

Таблица. Результаты моделирования образования литейных дефектов

Величина накладываемого давления	Макропористость, %	Микропористость, %
1) $p - \text{Const} = 100 \text{ МПа}$	0,31	$\leq 0,02$
2) $p - \text{Const} = 300 \text{ МПа}$	0,67	$\leq 0,08$
3) $p - \text{Const} = 500 \text{ МПа}$	0,34	$\leq 0,04$
4) $p - f(t)$ до 500 МПа	0,14	$\leq 0,005$

Рис. 3. Результаты моделирования при $p - \text{Const} = 100 \text{ МПа}$

ров, недоливов и заполнение пресс-формы. Расчет течения в решателе описывается полным уравнением Навье-Стокса и может проводиться совместно с анализом температуры и напряжений.

Уравнение Навье-Стокса вытекает из уравнения Эйлера для закона сохранения импульса. Но так как уравнение Эйлера справедливо только для жидкости без учета вязкости, то данное уравнение не будет описывать достоверно процессы протекания расплавленного металла в пресс-форме. С учетом этого прибегают к тензорному анализу, то есть введением дифференциальных операторов в форму записи уравнений, тем самым учитывая сдвиговую и объемную вязкость.

После применения ряда алгебраических действий и подстановки в уравнение движения уравнение Навье-Стокса приобретает вид:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho (v \cdot \nabla) v = -\nabla p + \eta \nabla^2 v, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости; $(\partial v)/\partial t$ – изменение скорости по времени; $v = (v^1, \dots, v^n)$ – векторное поле скорости; ∇ – оператор набла; ∇p – изменение внутреннего давления; $\eta \nabla^2 v$ – влияние внутренних сил (вязкость).

Для определения влияния давления, накладываемого на кристаллизующийся металл, помимо модуля Flow используются следующие модули про-

граммного продукта: Thermal – отвечает за характер распределения температуры в пресс-форме, а также модуль АРМ, отвечающий за расчет вероятности образования макро- и микропористости с учетом давления. Результатом является компьютерная модель, показывающая характер распределения накладываемого давления прессующими плунжерами в отливке и соответствующие дефекты. Информация о размерах образовавшихся дефектов необходима для выявления наиболее эффективного режима наложения давления на кристаллизующийся металл [5].

Расчет в модуле основан на решении уравнения Дарси и микросегрегации газа, также в модуле объединена модель макропористости и прогноз образования усадочных раковин [6].

Для определения влияния характера накладываемого давления на качество получаемых изделий проведен анализ алюминиевого сплава АК12. Значение величины накладываемого давления на кристаллизующийся металл варьировалось (таблица) при постоянных значениях: скорости подъема металла в пресс-форме 25–35 мм/с, температуры пресс-формы 150 °С, температуры расплава 750 °С, времени выдержки под давлением 60 с, температуры охлаждения пресс-формы на воздухе 20 °С, времени заливки металла 5 с.

Компьютерная модель режима заливки и опрессовки кристаллизующегося металла максимально приближена к реальному процессу, что подтверждено экспериментально [7].

При изменении величины и скорости наложения давления на кристаллизующийся металл прессующими плунжерами в ProCast наблюдается зависимость изменения макро- и микропористости. Первые три режима характеризуют поведение металла, обрабатываемого при постоянной величине давления (таблица). При увеличении значений накладываемого давления размеры дефектов усадочного происхождения сокращаются в объеме.

В отдельных случаях наложение постоянного давления не является эффективным, так как такой характер зачастую не позволяет избежать большинства литейных дефектов, что приводит к снижению механических свойств отливок. Четвертый режим подтверждает, что изменение скорости наложения давления влияет на структурные и механические свойства отливок. В работе смоделирована ситуация, когда наложение давления на кристаллизующийся металл осуществляется импульсами (рис. 4) [8, 9].

Такой характер изменения давления во времени показал наилучший результат. Микропористость в объеме отливки отсутствует или имеет не значитель-

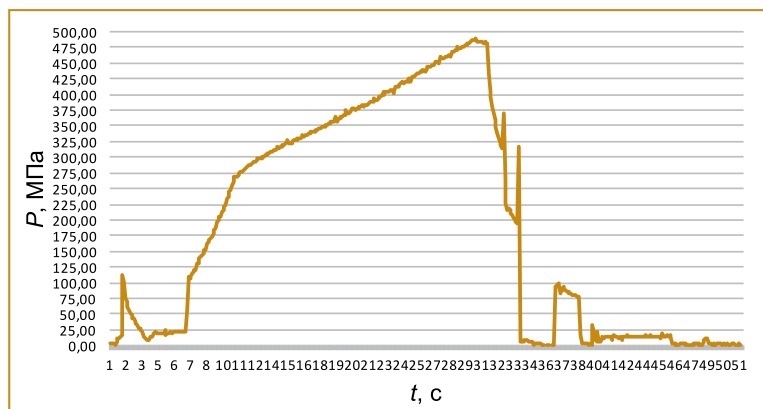


Рис. 4. Кривая, характеризующая импульсный режим обработки

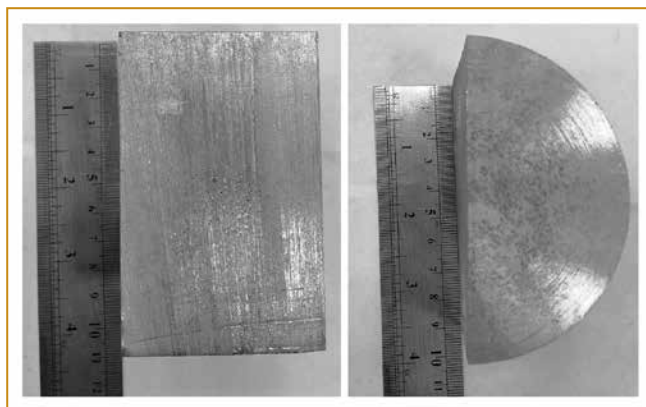


Рис. 5. Разрезанная отливка пополам

ный процент, а предполагаемая макропористость сократилась в 2 раза (рис. 5).

На образование твердых фаз и рост центров кристаллизации в исследовании процесса прессования металла во многом влияет давление, накладываемое на кристаллизующийся металл. Отсюда возникает необходимость управления данным параметром, чтобы на выходе заготовка имела высокие прочностные характеристики.

Заключение

Сравнение результатов компьютерного моделирования процесса литья с кристаллизацией под давлением с результатами, полученными экспериментальным путем, показало, что в отливке присутствуют дефекты там, где центры кристаллизации образуются в самый последний момент. Этот факт также подтверждается результатами макроанализа (рис. 5) [10].

На основе проведенных исследований сформулированы следующие выводы, которые могут служить рекомендациями для получения качественных изделий.

- Произведена оценка влияния величины накладываемого давления на расплавленный металл. Обнару-

жено, что при увеличении давления уменьшается объем макро- и микропористости, что приводит к увеличению прочностных свойств.

- Изменение характера накладываемого давления на металл ведет к значительному сокращению объема макропористости и исключает микропористость в отливке.
- Программный продукт ProCAST может быть использован для моделирования сложных процессов литья с кристаллизацией под давлением.

Список литературы

1. Коростелева В.Ф., Хромова Л.П. Управление формированием квазикристаллической структуры и свойств сплавов специального назначения. М.: Новые технологии, 2015. — 204 с.
2. Девятков С.В. ProCast — Виртуальное моделирование литейных технологий // CADmaster. 2006. № 5. С. 36-43.
3. Денисов М.С., Коростелев В.Ф. Автоматизация процесса формирования алюминиевых сплавов в условиях наложения давления на кристаллизующийся металл // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2018. №4. С. 159-167.
4. Вдовин Р.А. Компьютерное моделирование технологического процесса литья деталей двигателей в модуле Visual-Mesh программного продукта ProCast. Уч. пособие. Изд. Самарского университета. 2019. 108 с.
5. Александров С.Е., Голод В.М., Лунев В.А., Федотов Б.В. Математическое моделирование металлургических процессов. Уч. пособие. Л.: ЛПИ, 1988. 88 с.
6. Бланк В.Д., Эстрин Э.И. Фазовые превращения в твердых телах при высоком давлении: монография. М.: ФИЗМАТ-ЛИТ. 2011. 412 с.
7. Абдуллин А.Д. Компьютерное моделирование крупногабаритного литья в программном комплексе ProCAST // Металлург. 2012. № 10. 22-26 с.
8. Денисов М.С., Котов Г.А., Петухова С.М. Обоснование технологических режимов обработки кристаллизующегося металла давлением с использованием программного продукта ProCast // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 4(342). 22-27 с.
9. Kukartsev V.A., Rukosueva A.A., Ogol A.R., Kukartsev V.V., Tynchenko V.S., Khramkov V.V. Software for modeling the casting process // Journal of Physics: Conference Series. 2019. № 1399033101. p.1-7.
10. Denisov M.S., Kotov G.A. Simulation of a hydraulic pressure regulator used in automated casting and crystallization under pressure process // International multi-conference on industrial engineering and modern technologies (FarEastCon). 2020. p. 1-5.

Денисов Максим Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации, мехатроники и робототехники, Котов Георгий Александрович — студент, Петухова Софья Максимовна — студент Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Институт машиностроения и автомобильного транспорта.

E-mail: denisovmaxim90@mail.ru kotov1999gosha@mail.ru sofya.petukhova.01@mail.ru