



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Технология формообразования и художественная
обработка материалов»

Учебно-методическое пособие по дисциплине

«Разработка и оптимизация процессов литейного про- изводства»

Автор
Федосов А.В.

Ростов-на-Дону, 2018

Аннотация

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения направления 15.04.02 Технологические машины и оборудования

Автор

к.т.н., доцент кафедры «ТФиХОМ»
Федосов А.В.



Оглавление

1. Увеличение выхода годного металла посредством оптимизации объема прибылей.....4

Краткие теоретические сведения об обеспечении питания тепловых узлов отливок..... 5

Задание 1 9

Порядок работы 1..... 9

Пояснения к выполнению работы 110

Дополнительные требования к оформлению работы **Ошибка! Залладка не определена.**

2. Расчет напряжений и деформаций, возникающих в отливке во время кристаллизации сплава.....14

Краткие теоретические сведения по работе с модулем расчета напряжений в отливке14

Задание 219

Порядок работы 2.....19

Пояснения к выполнению работы 220

Дополнительные требования к оформлению работы **Ошибка! Залладка не определена.**

1. УВЕЛИЧЕНИЕ ВЫХОДА ГОДНОГО МЕТАЛЛА ПОСРЕДСТВОМ ОПТИМИЗАЦИИ ОБЪЕМА ПРИБЫЛЕЙ

Вопросы эффективности применяемых технологий в литейном производстве были и остаются одними из наиболее актуальных. Добиться обеспечения конкурентоспособности продукции в данной отрасли можно лишь за счет существенного сокращения издержек производства. Главную роль в этом вопросе по праву занимают методы увеличения выхода годного литья.

Показатель выхода годного описывает технологические потери металла при производстве отливок. Баланс металла в литейных процессах рассчитывает количество годных отливок как процент от металлозавалки. Коэффициент выхода годного литья (ВГ) определяется как отношение массы годного литья (отливки) к массе шихты с процентом угара и безвозвратными технологическими потерями (потерями при плавке, заливке в формы, весом металла, образующего литниковую систему, и весом бракованных отливок). Этот важный параметр измеряет, насколько эффективно литейное производство использует сырье.

Формула для расчёта ВГ:

$$\text{ВГ} = M_{\text{Г}}/M_{\text{ших}} \cdot 100\% ,$$

где $M_{\text{Г}}$ - масса годного литья (отливки), кг; $M_{\text{ших}}$ - масса шихты с процентом угара и безвозвратными технологическими потерями, кг.

Масса шихтовых материалов с учетом брака и потерь при плавке состоит из следующих составляющих:

$$M_{\text{ших}} = (M_{\text{приб}} + M_{\text{вып}} + M_{\text{ЛС}} + M_{\text{БП}} + M_{\text{Бр}}) \cdot 100\% ,$$

где $M_{\text{приб}}$ – масса прибылей, кг; $M_{\text{вып}}$ – масса выпоров, приходящаяся на одну отливку, кг; $M_{\text{ЛС}}$ – масса литниковой системы, приходящаяся на одну отливку, кг; $M_{\text{БП}}$ – безвозвратные потери на угар (от 0,5% при плавке в индукционной печи и до 3,5% при плавке в дуговых и пламенных печах), на сливы и скрап (1÷2)%, кг; $M_{\text{Бр}}$ – брак, кг.

Одним из основных подходов к увеличению выхода годного (ВГ) и сокращению дефектов усадочного происхождения в отливках является повышение эффективности работы литниково-питающей системы (ЛПС). Среднее значение ВГ для сталь-

ного литья находится в пределах 40...50%, а объём прибылей занимает порядка 20...40% всего объема формы.

Исходя из этого, актуальным является решение задачи по уменьшению объема прибылей, их рациональному расположению и уменьшению вероятности образования бракованной продукции.

Краткие теоретические сведения об обеспечении питания тепловых узлов отливок

Все методы предотвращения усадочных дефектов сводятся к созданию таких условий затвердевания, при которых недостаток жидкого металла в кристаллизующейся отливке или в отдельных ее узлах восполняется путем подвода дополнительного жидкого металла. Дополнительный подвод металла к месту образования усадочных дефектов должен быть непрерывным и продолжаться до полного затвердевания. Таким образом, кристаллизующийся слой отливки должен быть в контакте с жидким металлом.

Для компенсации усадки сплава отливок используют искусственные емкости жидкого металла, называемые прибылями (рис.1.1).

Прибыли различаются:

I. По форме (цилиндрические, шаровые, конические, прямоугольные и т. п.);

II. По принципу действия (обычные, обогреваемые, атмосферного давления, давления газа);

III. По методу подачи металла (прямого питания — установка сверху; бокового питания — отводные);

IV. По положению в форме (открытые и закрытые).

Конструкция прибылей зависит от различных факторов, учитывающих производственные традиции, номенклатуру литья, серийность производства, оборудование цеха и т. п. Для того чтобы прибыли выполнили свою роль, они должны отвечать определенным требованиям:

- объем и форма прибыли должны быть такими, чтобы количество жидкого металла в ней в каждый момент времени до полного затвердевания отливки превышало величину объемной усадки еще не затвердевшего металла (геометрический модуль прибыли ($M_G = V/S$) должен быть больше M_G отливки);
- длительность полного затвердевания прибыли должна превышать длительность затвердевания питаемого узла отливки;
- одновременно необходимо стремиться к тому, чтобы при выполнении указанных условий расход металла на прибыли был минимальным.

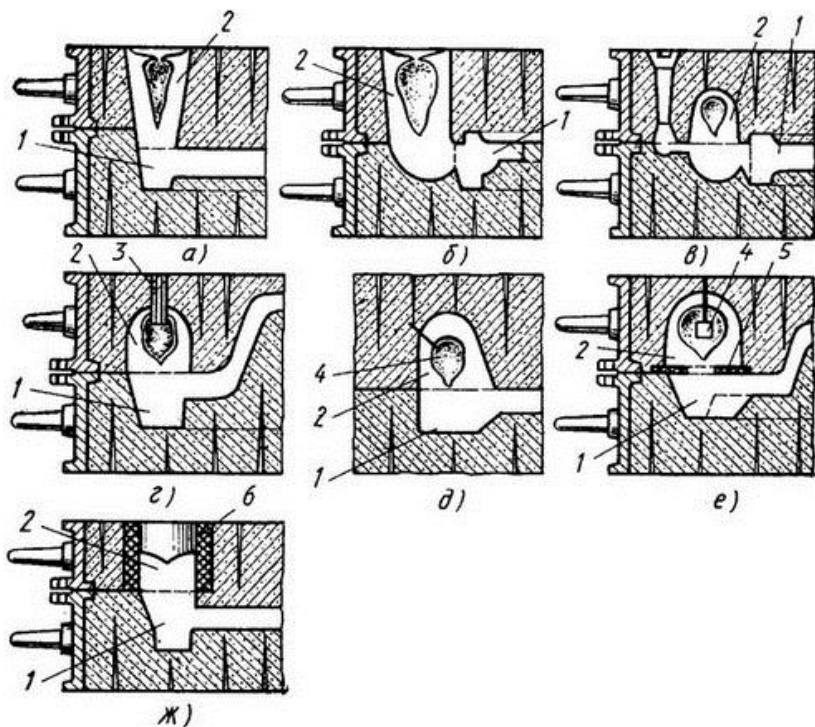


Рисунок 1 – Разновидности прибылей: а — открытая верхняя, б — открытая боковая (отводная), в — закрытая боковая (питающая бобышка), г — закрытая полусферическая прибыль с атмосферным давлением, д — закрытая прибыль с газовым давлением, е — закрытая легкоотделяемая прибыль с газовым давлением, ж — обогреваемая верхняя открытая прибыль; 1 — массивная (питаемая) часть отливки. 2 — прибыль, 3 — песчаный стержень с каналом для подвода атмосферного давления в среднюю часть прибыли, 4 — керамический патрон с зарядом газотворного вещества (например, мела), 5 — керамическая или стержневая разделительная пластина между прибылью и массивной частью отливки, 6 — песчаная втулка с термореактивной смесью (экзотермической), оформляющая прибыль и обеспечивающая подогрев в ней металла

Выполнение этих требований достигается созданием направленного затвердевания отливки. При направленном затвердевании кристаллизация отливки или отдельных ее частей происходит последовательно в направлении к прибыли с таким расчетом, чтобы к каждому ранее затвердевшему слою отливки

Разработка и оптимизация процессов литейного производства

был доступ жидкого металла из прилегающего слоя, затвердевающего позже.

Рациональное использование объема прибылей достигается применением технологических приемов:

1. построение литниковых систем, которые обеспечивают поступление металла в области расположения тепловых узлов, компенсируя усадку на периферии отливки;

2. размещение литниковой системы в «центре тепла» опок, а деталей отливки на периферии обеспечивает возможность постоянного поступления расплавленного сплава и профилактики образования пор в отливке;

3. уменьшение отвода тепла от прибыли путем применения формовочных материалов с малой охлаждающей способностью, например, асбеста, пористых огнеупорных материалов, изоляции открытой поверхности прибыли и т. д.;

4. подогрев металла в прибыли, главным образом путем облицовки ее экзотермическими смесями, выделяющими большое количество тепла при контакте с металлом;

5. применение рациональной формы прибыли минимизирующей тепловые потери.

Хорошо известно, что наименьшими тепловыми потерями обладает объем в форме шара, для которого геометрический модуль M_G имеет максимальное значение. Однако, применение прибылей такой формы в условиях машинной формовки с горизонтальной плоскостью разъема не всегда технологично. Кроме того, в условиях бокового питания прибыль должна обеспечивать определенное ферростатическое давление, а значит ее высота должна превышать высоту теплового узла. Так, широкое распространение получили цилиндрические прибыли с соотношением H/D более единицы и небольшими формовочными уклонами (2° - 5°). Вероятно, что простая цилиндрическая форма прибыли не является оптимальной в отношении ее тепловой эффективности, в связи с чем на практике используются различные альтернативные варианты геометрической конструкции прибылей. Можно выделить три направления, по которым производится оптимизация геометрии прибылей:

1. увеличение геометрического модуля M_G (приближение ее формы к форме шара);

2. выполнение в верхней части прибыли выемок различной конфигурации;

3. комбинированный подход, объединяющий первые два.

В соответствии с первым подходом, верхнюю часть прибыли стараются выполнить в виде купола, что существенно уменьшает тепловые потери и увеличивает ее тепловую эффективность. В то же время, применение прибылей с выемками часто сопровождается улучшением и стабилизацией показателей качества, несмотря на то, что M_G уменьшается.

Выемка в верхней части прибыли, в процессе формовки заполняется формовочной смесью, образуя болван – концентратор. При заполнении формы жидким металлом, концентратор оказывается погружен в него, благодаря чему разогревается сильнее, чем смесь вокруг прибыли. Таким образом, он выступает в роли «горячей точки» замедляющей затвердевание металла и формирование сплошной твердой оболочки, наличие которой является причиной образования разряжения внутри объема прибыли, ухудшающего условия питания отливки.

Специалист литейщик, в зависимости от специфических условий производства, должен уметь определить наиболее рациональный подход по уменьшению металлоёмкости ЛПС и увеличению выхода годного. Однако, даже при наличии большого опыта не всегда можно учесть все нюансы технологии изготовления отливки. Поэтому, на сегодняшний день, наиболее современным и эффективным средством оптимизации литейных процессов является применение средств математического моделирования, которые способны прогнозировать образование усадочных и других типов дефектов и оперативно, без вмешательства в производственный процесс, выполнять оптимизацию технологии.

Задание 1

Цель: закрепление знаний о причинах появления и методах устранения усадочных дефектов. Получение навыков работы с системами моделирования литейных процессов в процессе прогнозирования усадочных дефектов и оптимизации технологии производства отливок.

Задание: произвести оптимизацию технологии производства отливки с целью получения максимальных значений выхода годного при условии обеспечения минимального уровня брака по дефектам усадочного характера.

Исходные данные:

1. Отливка – чертеж и требования к отливке выдаются преподавателем.
2. Тип формовки – задается преподавателем в соответствии с чертежом отливки.

Порядок работы 1

1. Выполнить краткий теоретический обзор по следующим вопросам:

- Усадочные дефекты и причины их появления;
- Особенности усадки различных сплавов (сталь, чугун, алюминиевые и бронзовые сплавы) в процессе их кристаллизации;
- Методы устранения усадочных дефектов.

2. Подготовка 3D модели первого технологического варианта изготовления отливки выполняется в CAD среде Компас. Для расчета ЛПС применяются методы и готовые расчетные схемы, рассмотренные на предыдущих курсах обучения. Компоновка и сборка литейного куста производится студентом самостоятельно с учетом заданных габаритов опок.

3. Моделирование подготовленного технологического варианта.

Важное условие – назначение идентичных начальных и граничных условий моделирования для всех прорабатываемых технологических вариантов.

4. Расчет основных показателей технологии на базе результатов математического прогноза. Результаты расчета свести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1. – Пример расчета основных показателей литейной технологии

№ Варианта	Наименование отливки	Марка материала	Количество отливок в форме, шт.	Масса отливки, кг	Металлоемкость формы, кг	Объем усадки в теле отливки, %	Мак пористость, %	Вероятность образования дефекта	ТВГ, %	ВГ, %
1	205 Хомут	ВЧ-45	6	1,2	9	10	45	56	80	7,8
2	205 Хомут	ВЧ-45	6	1,2	10	10	20	31	72	34
3	205 Хомут	ВЧ-45	6	1,2	12,5	5	3	6	58	49
4	205 Хомут	ВЧ-45	6	1,2	13	0	0	0	55	52

5. Произвести расчет нескольких вариантов (минимум 4 варианта) с целью получения максимальных значений величины ВГ.

При проектировании вариантов предлагается оперировать размером, расположением и количеством прибылей, а также скоростью и местом подвода металла.

6. Произвести оценку полученных вариантов и составить вывод с указанием наиболее подходящего варианта литейной технологии.

В выводе отразить полученные в ходе работы новые навыки и знания по применению средств автоматизации в процессе оптимизации литейной технологии и непосредственно полученные в ходе работы результаты.

Пояснения к выполнению работы 1

Массу отливки и металлоемкость формы рассчитать с помощью стандартных средств Компас – МЦХ, предварительно убедившись в корректном назначении материалов для всех тел.

Расчет вероятности образования дефекта (ВОД) производится на основе данных математического прогноза:

Объем усадки в теле отливки, % (ОУ) - оценивается визуально по 3D изображению поля усадки.

Максимальное значение численного параметра усадки, %

Разработка и оптимизация процессов литейного производства

(МУ) - при перемещении курсора на участок отливки с наибольшей степенью усадки появится всплывающая подсказка с указанием уровня дефекта в процентах.

Параметр «Усадка» представляет собой вероятностное распределение усадочных дефектов. Значение усадки показывает соотношение среднеинтегральной плотности материала в расчетном элементе модели (ρ) к «идеальному» значению (ρ_0), что по сути выражает объем пустот, возникающих в процессе усадки материала:

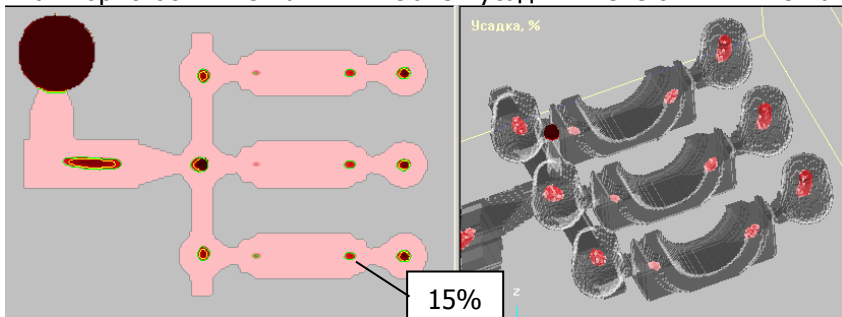
$$\text{«Усадка»} = (1 - \rho_0/\rho) \cdot 100\%$$

Поскольку данная величина выражает среднеинтегральное значение в объеме расчетного элемента, то нельзя с уверенностью прогнозировать степень локализации дефекта, выражающей его проявление либо в виде макрораковин, либо в виде микропористости. Несмотря на это, зависимость между значением усадки и вероятностью проявления макродефекта однозначно прямопропорциональная.

Расчет:

Мах пористость - 15 %

Объем усадки в теле отливки - 5 %



$$ВОД = (МП / 100) \left(0,9 - \frac{1,70У}{100} \right)$$

ТВГ – технологический выход годного определяется как отношение массы отливок к общей массе литейного куста.

ВГ – выход годного с учетом уровня брака и безвозвратных потерь:

$$ВГ = ТВГ(1 - ВОД \cdot k - БП) , \%$$

где k – коэффициент, учитывающий потери, связанные с обработкой некондиционной продукции;

БП – доля безвозвратных потерь (для серого чугуна при-

нимаем - 0,055; для высокопрочного чугуна – 0,065; для стали – 0,09)

Требования к оформлению графической части работы 1

На всех этапах отразить результаты расчетов в виде скриншотов:

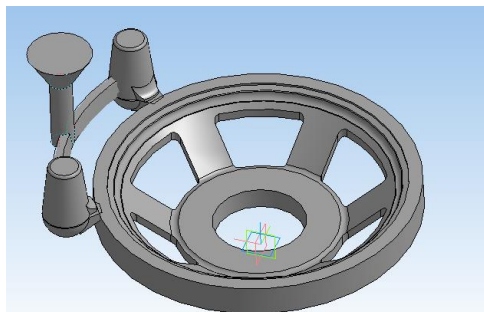


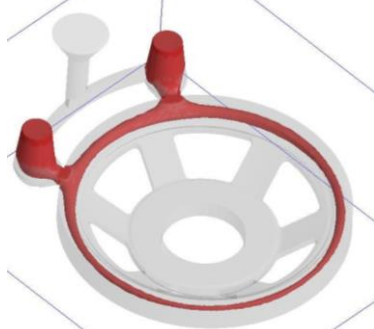
Рис. - Внешний вид технологического варианта №



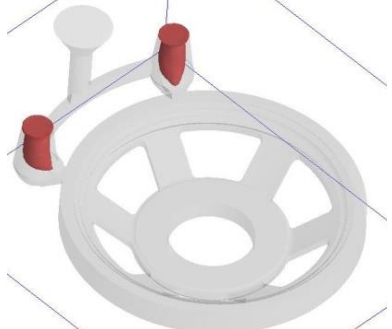
Жидкая фаза – 51,8%



Жидкая фаза – 40%



Жидкая фаза – 13,7%



Жидкая фаза – 5,5%

Рис. - Динамика процесса кристаллизации

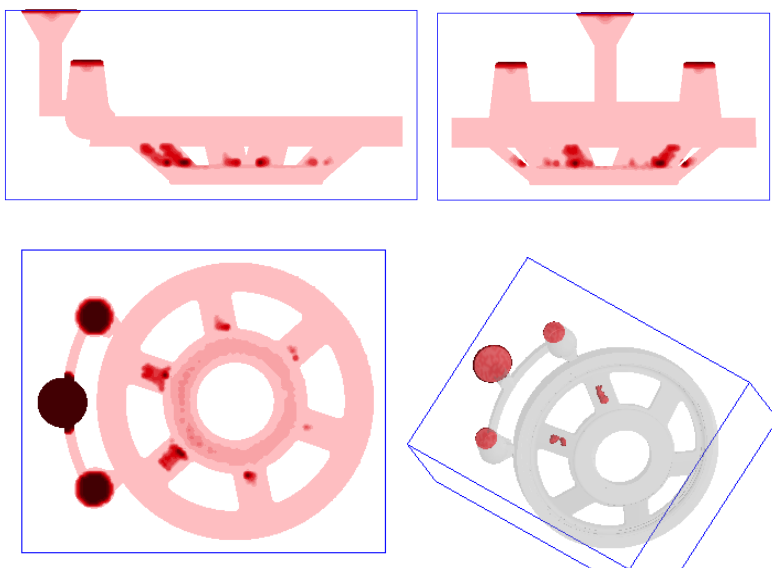


Рис. - Результирующее поле усадки

Результаты расчета, представленные на рисунках, должны быть снабжены поясняющими комментариями.

2. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ОТЛИВКЕ ВО ВРЕМЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СПЛАВА

В отливках в результате неравномерного затвердевания тонких и толстых частей и торможения усадки формой при охлаждении возникают внутренние напряжения. Эти напряжения тем выше, чем меньше податливость формы и стержней. Если величина внутренних напряжений превзойдет предел прочности литейного сплава в данном участке отливки, то в теле её образуются горячие или холодные трещины. Если литейный сплав имеет достаточную прочность и пластичность и способен противостоять действию возникающих напряжений, то искажается геометрическая форма отливки.

Горячие трещины в отливках возникают в процессе кристаллизации и усадки металла при переходе из жидкого состояния в твёрдое, при температуре близкой температуре солидуса. Горячие трещины проходят по границам кристаллов и имеют черную окисленную поверхность. Склонность сплавов к образованию горячих трещин увеличивается при наличии неметаллических включений, газов (водорода, кислорода), серы и других примесей. Кроме того, образование горячих трещин вызывают резкие переходы от тонкой части отливки к толстой, острые углы, выступающие части и т.д. Высокая температура заливки способствует увеличению зерна металлической структуры и увеличению перепада температур в отдельных частях отливки, что повышает вероятность образования трещин.

Для предупреждения возникновения горячих трещин в отливках необходимо создавать условия, способствующие формированию мелкозернистой структуры; обеспечивать одновременное охлаждение тонких и толстых частей отливок; увеличивать податливость литейных форм; по возможности снижать температуру заливки сплава и т. д.

Краткие теоретические сведения по работе с модулем расчета напряжений в отливке

Российской САЕ системой, позволяющей производить оценку напряжений в отливках для предупреждения появления горячих трещин, является программный модуль «Расчет напряжений» (Stress) продукта LVMFlow.

Модуль «Расчет напряжений» обеспечивает расчет напря-

Разработка и оптимизация процессов литейного производства

жений и смещений, возникающих при остывании отливки с учетом нарастания твердой корочки.

Важно отметить, что расчет напряжений возможен только при условии использования материалов, имеющих в своей базе данных температурные зависимости механических свойств. Такие сплавы, помечены в названии _STRESS.

Методика работы с модулем «Расчет напряжений».

1. В модуле Default.exe

Меню МОДЕЛИРОВАНИЕ -> РЕШАТЕЛЬ пометить галочкой пункт ФОРМИРОВАНИЕ ДАННЫХ для расчета напряжений.

2. При расчете обязательно записывать ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ. Автозапись - по критерию жидкая фаза через 1%, по температуре запись до 100 °С с шагом 10 °С.

3. Автостоп (меню МОДЕЛИРОВАНИЕ -> АВТОСТОП) установить остановку по максимальной температуре 100 °С

4 После окончания расчета тепловой задачи запускаем модуль STRESS.

Выбираем меню МОДЕЛИРОВАНИЕ -> МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ

В окне МАТЕРИАЛ ФОРМЫ задать параметр жесткости формы, который варьируется от 0 до 1 (0 - податливая форма. 1- Абсолютно жесткая форма.

5. Далее в меню МОДЕЛИРОВАНИЕ необходимо задать температурные поля, для которых будут считаться напряжения, при этом необходимо удалить из начала списка температурные поля, которые соответствуют жидкой фазе от 100 до 75%.

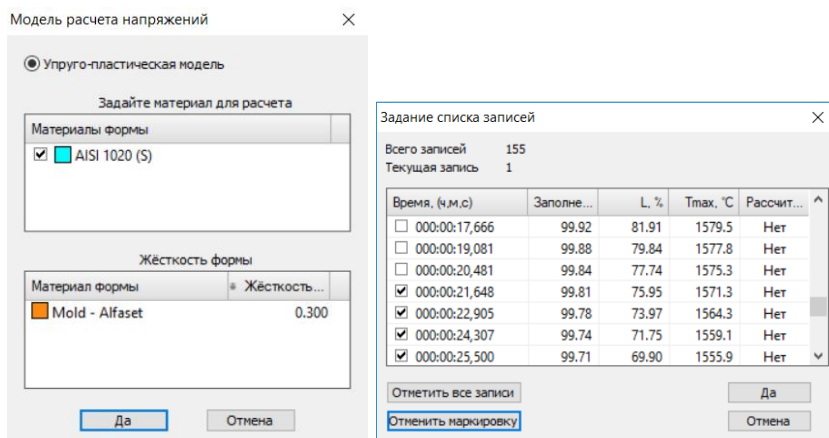


Рис. 2.1 – Внешний вид окон для задания начальных условий для расчета напряжений

Разработка и оптимизация процессов литейного производства

6. После задания условий можно запустить расчет.
7. После окончания расчета можно открыть модуль просмотра паспортов и просмотреть все рассчитанные поля.
 - Смещения в X,Y,Z направлениях;
 - Поле сдвиговых напряжений;
 - Поле напряжений сжатия;
 - Поле критических напряжений сдвига.

Смещения являются результатом деформаций, возникающих в отливке в процессе остывания. Поле смещений в трехмерном виде высвечивается искаженным с заданным коэффициентом увеличения (меню РЕДАКТИРОВАТЬ). Это для того, чтобы лучше оценить в каких местах и в каких направлениях происходят смещения. Высвечиваемые стрелки на сечении поля смещений показывают направление смещений. Цвет показывает модуль вектора деформации (величину смещения).

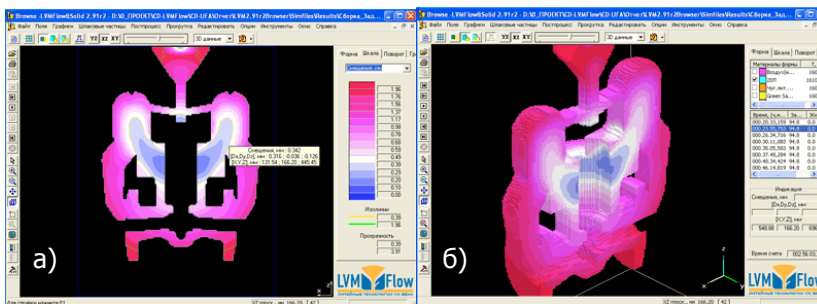


Рис. 2.2 - Смещение в отливке в различные моменты времени при отображении 2D (а) и 3D (б)

Критические напряжения сдвига - это предел упругости при одноосном растяжении при температуре солидуса;

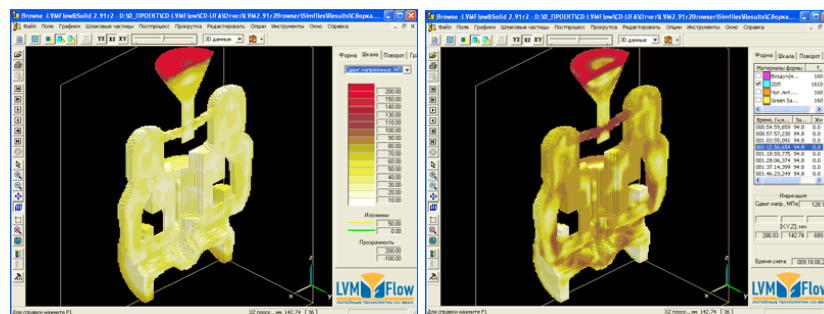


Рис. 2.3 - Поле сдвиговых напряжений в отливке в различные моменты времени (выводятся значения давления, МПа)

Разработка и оптимизация процессов литейного производства

Напряжение сдвига - характеризует величину сдвиговых напряжений в среде. Принимает только неотрицательные значения, измеряется в единицах давления;

Напряжения сжатия - характеризуют изотропную часть растягивающих напряжений в среде. Положительное давление соответствует растягивающей изотропной части, отрицательное - сжимающей части.

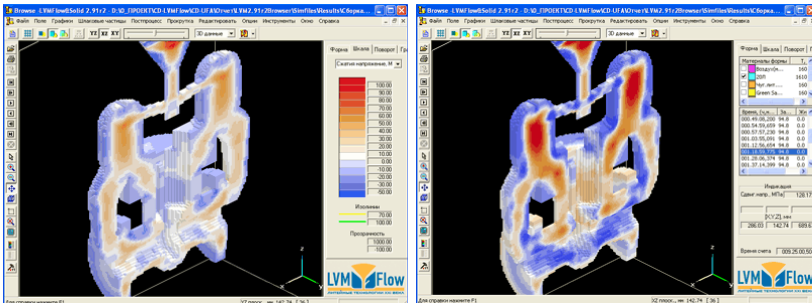


Рис. 2.4 - Поле напряжений сжатия в отливке в различные моменты времени (выводятся значения давления, МПа)

Интенсивность пластической деформации – представляет собой величину тензора накопленной пластической деформации в точке среды. Принимает только неотрицательные значения, измеряется в безразмерных единицах;

Работа пластической деформации - представляет собой объемную плотность работы напряжений по пластическому деформированию точки среды. Измеряется в единицах давления;

Максимальное главное напряжение – наибольшее главное значение тензора напряжений. Представляет собой наибольшее напряжение нормального одноосного растяжения в точке среды. Если МГН положительно, то его значение соответствует максимально возможному по величине нормальному напряжению растяжения в точке. Если МГН отрицательно, то его значение соответствует минимально возможному по величине нормальному напряжению сжатия в точке. Измеряется в единицах давления.

Критерий горячих трещин (КГТ) - для каждой точки отливки связан с максимальным нормальным растягивающим напряжением в момент времени достижения температуры солидус

при полной кристаллизации. Если Максимальное Главное Напряжение (МГН) при достижении температуры солидус отрицательно, то точка в этот момент времени гарантированно находится в состоянии сжатия. Если МГН положительно, то точка испытывает растягивающие усилия, под действием которых возможен разрыв кристаллического каркаса в плоскости, расположенной по нормали к этому направлению. Вероятность реализации такого разрыва тем выше, чем выше величина нормальных растягивающих напряжений. В качестве КГТ принимается безразмерная характеристика, рассчитываемая по уравнению:

$$КГТ = МГН / МГН_{crit},$$

где $МГН_{crit}$ - является некоторым критическим пороговым значением, начиная с которого возможно образование горячих разрывов. В качестве $МГН_{crit}$ используется критическое напряжение сдвига при температуре солидус.

В поле **напряжений сжатия** выводятся значения давления со стороны формы на отливку.

Критические напряжения сдвига — это предельные значения напряжений, при достижении которых возникает пластическая деформация.

Задание 2

Цель: закрепление знаний о причинах появления и методах устранения горячих трещин в отливках. Получение навыков работы с модулем для расчета и анализа термических напряжений, возникающих при кристаллизации отливок.

Задание: произвести оценку термонапряженного состояния технологии производства отливки с целью определения участков, склонных к образованию трещин. Провести анализ изменения геометрии отливки. Оценить влияние жёсткости материала формы на результаты расчетов термонапряженного состояния.

Исходные данные:

1. Отливка – чертеж и требования к отливке выдаются преподавателем.
2. Тип формовки – задается преподавателем в соответствии с чертежом отливки.
3. Для первого варианта формовки коэффициент жесткости формы установить равным 0,5, для второго варианта равным 0,9.

Порядок работы 2

1. Выполнить краткий теоретический обзор по следующим вопросам:
 - Механизм образования горячих трещин;
 - Особенности образования напряжений и трещин в различных сплавах (сталь, чугун, алюминиевые и бронзовые сплавы) в процессе их кристаллизации;
 - Методы предотвращения образования напряжений и трещин в отливках.
2. В качестве исходной технологии принимается наилучший вариант по результатам проведения оптимизации выхода годного литья.
3. Моделирование подготовленного технологического варианта производится в модуле для расчета напряжений (Stress). Исходными данными для этого модуля являются результаты расчета процесса кристаллизации отливки.
4. По полученным результатам расчета термонапряженного состояния отливки определить максимальные значения полей: смещение, максимальные главные напряжения, максимальные критические напряжения, критерий горячих трещин. Пример

определения этих значений приведен на рисунках 2.5-2.7.

5. Полученные результаты расчетов термонапряженного состояния для отливки свести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1. – Пример результатов расчета термонапряженного состояния

Коэффициент жесткости формовочной смеси	Смещение (макс/мин), мм	Величина допуска в соответствии с требованиями степени размерной точности отливки, мм	Максимальные критические напряжения, МПа	Максимальные главные напряжения (положительные), МПа	Максимальные главные напряжения (отрицательные), МПа	Критерий горячих трещин
0,5	0,3 / 5,5	6	347	220	-50	0,6
0,9	0,1 / 1,3	6	347	540	-120	1,6
Соотношение	0,3 / 0,23		1	2,5	2,4	2,7

6. Провести анализ соответствия отклонений размеров отливки предъявленным требованиям степени размерной точности по ГОСТ Р 53464-2009.

7. Произвести оценку полученных вариантов и составить вывод с указанием участков отливок, наиболее склонных к образованию трещин.

8. Проанализировать влияние коэффициента жесткости формы на результаты расчета.

В выводе отразить полученные в ходе работы новые навыки и знания по применению средств автоматизации в процессе оптимизации литейной технологии и непосредственно полученные в ходе работы результаты.

Пояснения к выполнению работы 2

Для определения максимальных величин расчетных полей рекомендуется пользоваться методом подбора значений цветовой шкалы и изолиний для достижения более контрастного отображения результатов.

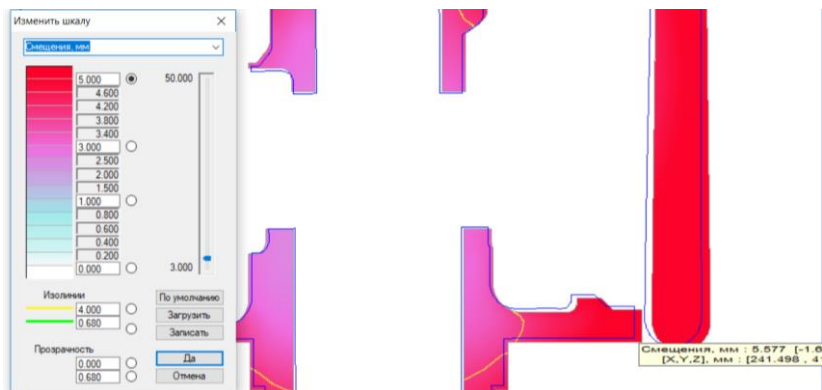


Рис. 2.5 - Пример определения максимальных значений смещений

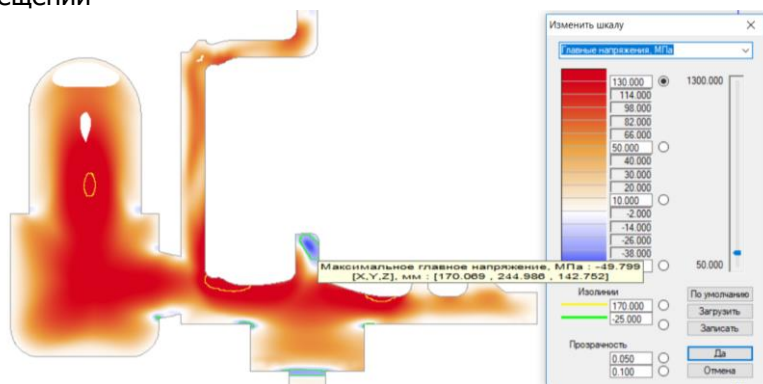


Рис. 2.6 - Пример определения максимальных значений главных напряжений

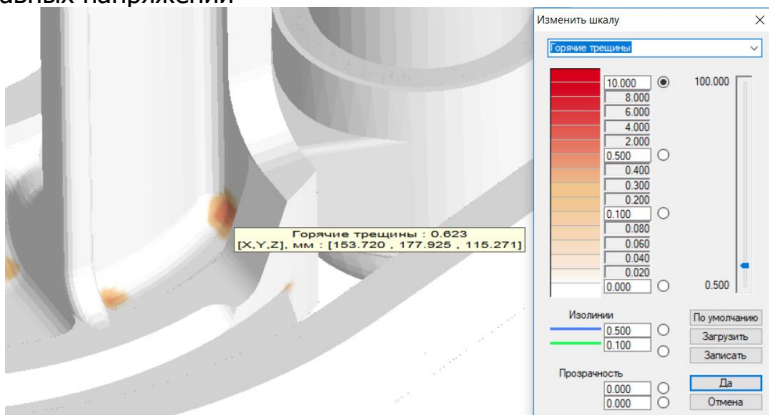
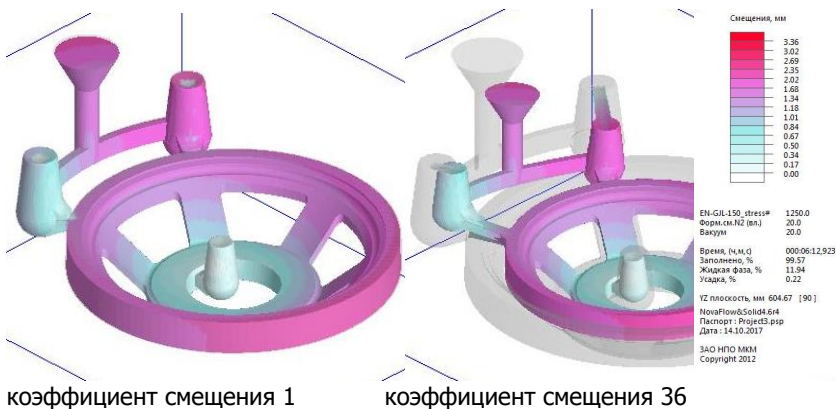


Рис. 2.7 - Пример определения максимального значения критерия горячих трещин

Требования к оформлению графической части работы 2

На всех этапах отразить результаты расчетов в виде скриншотов:



коэффициент смещения 1

коэффициент смещения 36

Рис. – Смещение

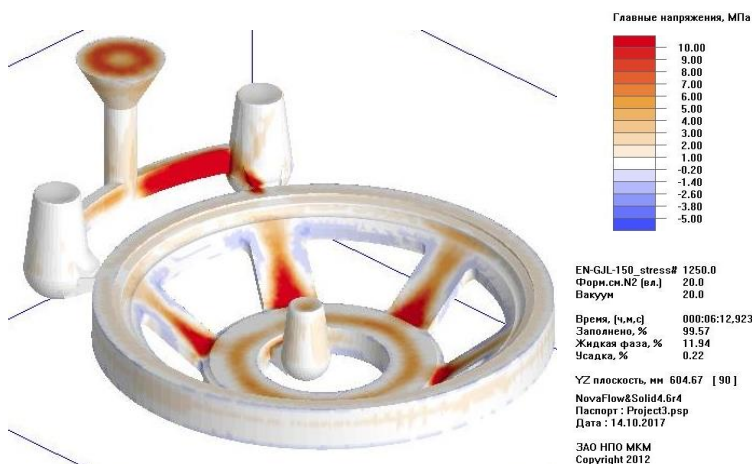


Рис. – Главные напряжения

Разработка и оптимизация процессов литейного производства

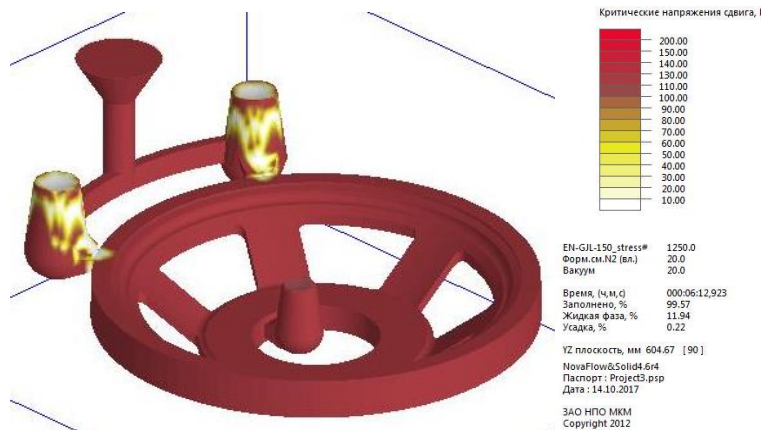


Рис. – Критические напряжения

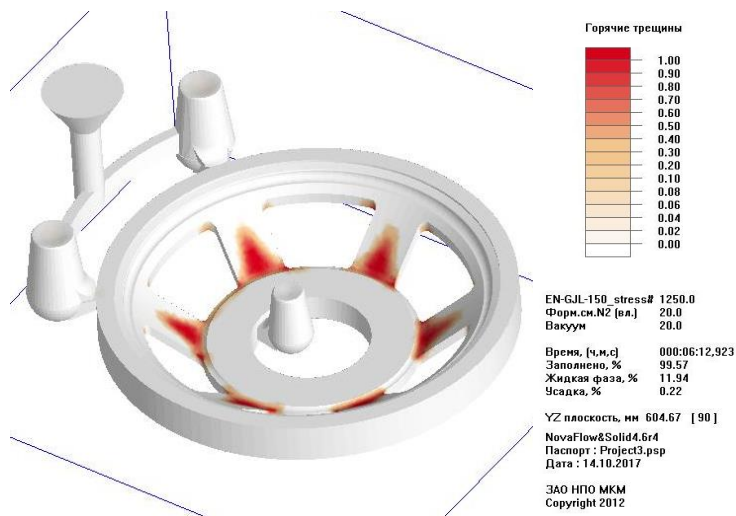


Рис. – Горячие трещины

Результаты расчета, представленные на рисунках, должны быть снабжены поясняющими комментариями.

3. УВЕЛИЧЕНИЕ ВЫХОДА ГОДНОГО МЕТАЛЛА ПОСРЕДСТВОМ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ

Холодильники устанавливают в литейную форму для предупреждения образования усадочных раковин. Механизм действия металлических холодильников заключается в отводе от массивного места затвердевающей отливки большого количества тепла, так как их теплопроводность и теплоемкость больше, чем у песчаной формы. Выравнивая скорость охлаждения массивных толстых и более тонких мест отливки, холодильники снижают вероятность образования в ней усадочных дефектов.

Конструирование холодильников заключается в установлении их размеров (массы), обеспечивающих достаточную степень охлаждения массивных мест отливки. Требуемую массу холодильников устанавливают методами теплофизических расчетов, а их размеры — по размерам охлаждаемых мест отливок.

Различают два вида холодильников:

- внутренние;
- наружные.

Обладая высокой теплопроводностью и способностью аккумулировать теплоту, внешний холодильник значительно ускоряет процесс затвердевания расплава в массивном узле, ввиду чего уменьшается опасность образования в нем усадочных дефектов. Внутренние холодильники делают из сплава, близкого по составу с заливаемым в форму. Внутренний холодильник расплавляется, заполнивший охлаждаемый узел расплавом или сваривается с ним, на что расходуется значительное количество теплоты. В результате расплав в массивном узле быстро охлаждается и затвердевает, не образуя усадочных дефектов.

Наружные холодильники, как правило, клеивают в форму, для этого используют клеи на основе жидкого стекла. Эффективность внешних холодильников ниже, чем внутренних, но применяют их чаще, так как они не нарушают сплошности металла в отливке.

Подготовка и установка холодильников усложняет процесс изготовления форм, вызывает опасность образования некоторых дефектов в отливках, например, газовых раковин (вскипов), если поверхность холодильника окислена, загрязнена или покрыта влагой. Необходима тщательная подготовка холодильников (очистка, лужение и т. п.). Кроме того, возможности регулирования скорости охлаждения отдельных частей отливки с по-

мощью холодильников ограничены. Поэтому в целях получения плотных отливок нередко холодильники применяют в сочетании с прибылями.

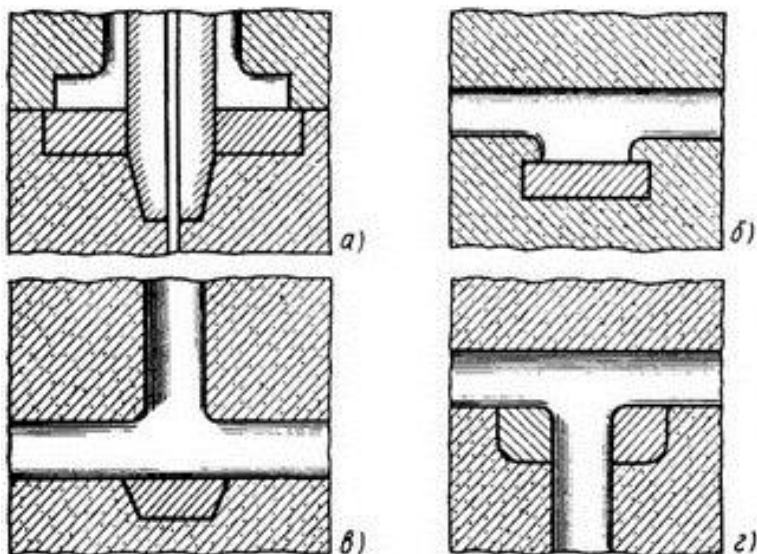


Рис. 3.1 – Примеры применения внешних холодильников: а — охлаждение массивного фланца плоским кольцевым холодильником, б — охлаждение бобышки плоским дисковым холодильником. в — охлаждение узла в месте сочленения стенок отливки плоским (пластинчатым) холодильником, г — охлаждение Т-образного узла двумя фасонными холодильниками

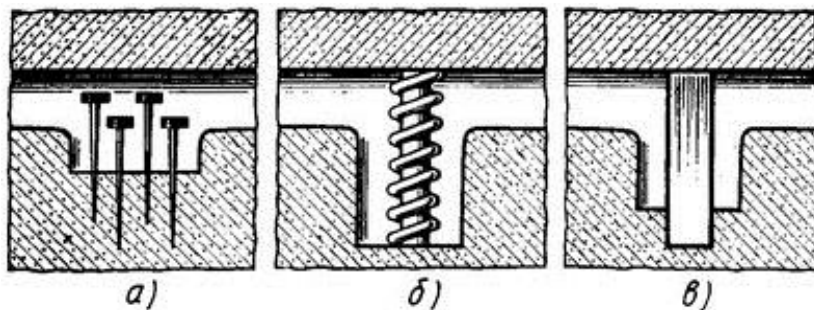


Рис. 3.2 – Примеры охлаждения тепловых узлов внутренними холодильниками различного типа: а — гвоздями, б — проволоочной спиралью, в — прутком

Краткие теоретические сведения по работе с модулем расчета напряжений в отливке

Для моделирования процесса применения холодильников либо других материалов с отличными от формы теплофизическими свойствами виртуальную геометрию этих элементов необходимо представить в виде отдельных тел. Подготовку геометрии удобно провести в CAD среде и сохранить объемы в отдельные файлы сборки которых осуществляется в модуле «3D импорт».

Сборка модели производится с помощью опции «добавить тело». При этом следует учитывать, что в порядке присоединения геометрии, каждое следующее тело вытесняет предыдущий объем. Так если применяется внутренний холодильник следует сначала добавить объем отливки, а потом объем холодильника.

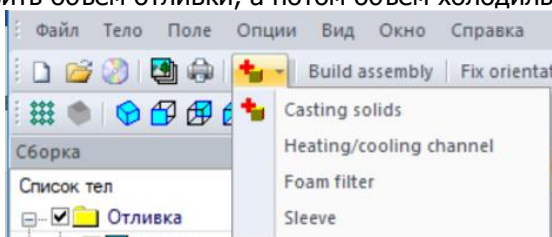


Рисунок 3.3 – Расположение опции «добавить тело»

В модуле «Начальные условия» следует провести корректное назначение материалов будущей модели. Различные объемы модели представлены различными цветами, что помогает правильно назначить материалы. Все материалы, которые не предполагаются моделировать в жидком виде (в том числе и холодильники), должны быть назначены из типа материалов «Материал формы»

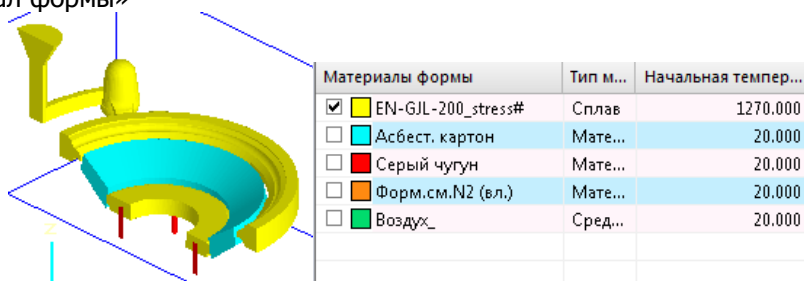


Рис. 3.4 – Назначение материалов холодильников и теплоизоляции

Задание 3

Цель: закрепление знаний о видах и способах применения холодильников для организации направленной кристаллизации в отливках. Получение навыков работы с несколькими разнородными материалами в среде LVMFlow и анализа температурных полей модели с позиции оценки эффективности организации процесса направленной кристаллизации посредством установки холодильников.

Задание: Выбрать тип холодильника, разработать конструкцию и предложить его месторасположение в форме. Сформировать модель, начальные и граничные условия формы под заливку с холодильниками. По результатам расчета произвести оценку тепловых полей модели с целью определения особенностей влияния холодильников на направление и скорость движения фронта кристаллизации. Провести сопоставительный анализ двух вариантов технологий с и без холодильников.

Исходные данные:

1. Отливка – чертеж и требования к отливке выдаются преподавателем.
2. Тип формовки – задается преподавателем в соответствии с чертежом отливки.
3. Тип, форма и местоположение холодильников выбираются студентом совместно с преподавателем.
4. Материал холодильника принять идентичным материалу сплава отливки.
5. Начальную температуру холодильника принять равной начальной температуре формы.

Порядок работы 3

1. Выполнить краткий теоретический обзор по следующим вопросам:
 - Механизм работы холодильников по устранению усадочных дефектов;
 - Особенности применения холодильников в отливках из различных сплавов (сталь, чугун, алюминиевые и бронзовые сплавы);
 - Методы установки холодильников в литейные формы.
2. В качестве исходной технологии принимается один из ва-

Разработка и оптимизация процессов литейного производства

риантов работы по оптимизации выхода годного литья, характеризующийся наихудшими показателями поля усадки.

3. В CAD среде Компас произвести подготовку геометрии холодильников.

4. Используя средства работы с геометрией в модуле «3D импорт» произвести сопряжение геометрических объемов отливки и холодильников.

5. Произвести подготовку необходимого материала холодильника используя средства работы в модуле «База данных».

6. Назначить начальные и граничные условия модели и произвести полный расчет.

7. По полученным результатам расчета теплового состояния отливки определить направление и скорости продвижения фронтов кристаллизации на участках контакта расплава с формой и холодильником. Пример определения этих значений и формирования графической части отчета приведен на рисунках 3.5-3.6.

8. Рассчитать выход годного технологии с применением холодильников и произвести сопоставление с результатами, полученными в практической работе №1. Оценить эффективность и целесообразность применения холодильников. При необходимости произвести повторное моделирование с корректировкой технологии.

9. Полученные результаты расчетов свести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1. – Сопоставление результатов моделирования и оценка эффективности применения холодильников

Технология	Масса отливки, кг	Объем отливки, см ³	Время затвердевания отливки		Скорость затвердевания, кг/мин	Жидкая фаза в момент затвердевания отливки, %	Объем холодильников, мм ³	Доля холодильников, %	ВГ, %
			мин	с					
Без холодильника	3,12	433	12	54	0,24	0,1	0		46
С холодильником Вариант1			9	33	0,38	4	22,5	5,19	51
Соотношение Вариант1			1,35		1,35	40			1,11
С холодильником Вариант2	3,12	433	9	5	0,34	4	22,7	5,24	52
Соотношение Вариант2			1,42		1,42	40			1,13

Разработка и оптимизация процессов литейного производства

10. Проанализировать влияние различных холодильников на результаты расчета.

В выводе отразить полученные в ходе работы новые навыки и знания по применению средств автоматизации в процессе оптимизации литейной технологии и непосредственно полученные в ходе работы результаты.

Пояснения к выполнению работы 3

Определение скорости роста твердой фазы производится на основании положения изолинии, выражающей долю твердой фазы равной 70%, в различные моменты времени. Участок, по которому производится определение положения изолинии, рекомендуется выбирать на тепловой оси исследуемого узла отливки. Для удобства определения положения изолинии предлагается использовать отображение линий расчетной сетки.

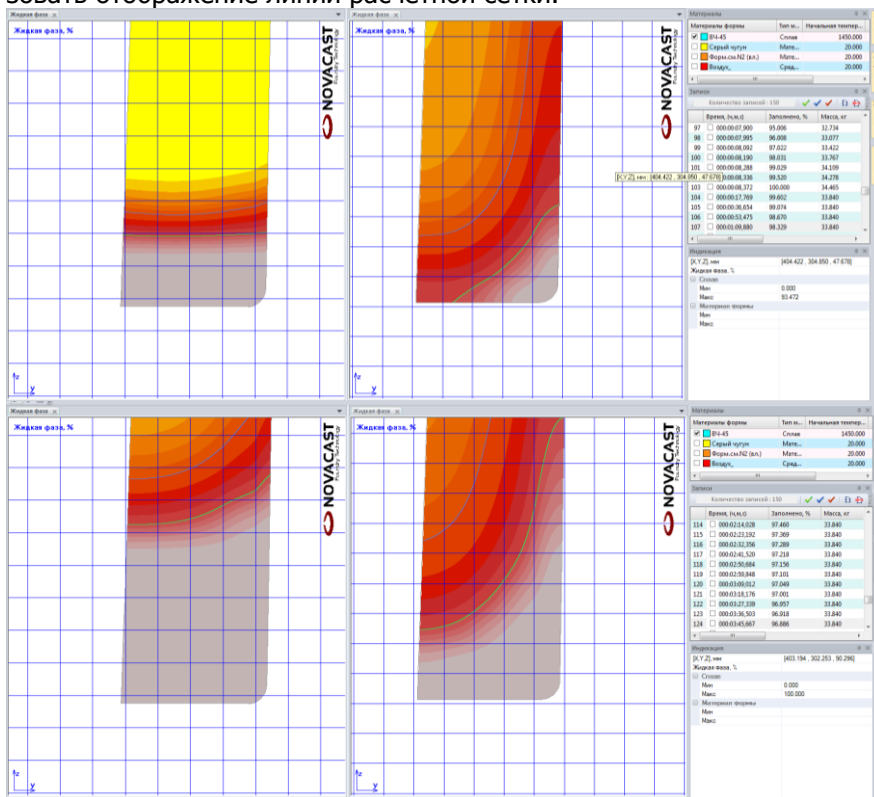


Рис. 3.5 - Пример определения скорости роста твердой фазы по результатам моделирования

Результаты определения положения границы твердой фазы в различные моменты времени свести в таблицу.

№ замера	С холодильником		Без холодильника	
	Время, с	Толщина затвердевшей корки, мм	Время, с	Толщина затвердевшей корки, мм
1	305,4	4	17,7	4,3
2	363,6	8,6	53,5	10
3	426,6	14,8	88	13,3
4	480,6	19,5	124	17,9
5	540,5	24	225	29,5

Определение скорости роста твердой фазы произвести с помощью аналитических возможностей MS Excel или других электронных таблиц. По полученным данным о положении фронта кристаллизации строится график зависимости толщины корочки от времени затвердевания. Строится линия тренда. Коэффициент при аргументе функции представляет собой значение скорости продвижения фронта кристаллизации.

На рисунке ниже приведен пример обработки данных и определения коэффициентов усредняющего уравнения.

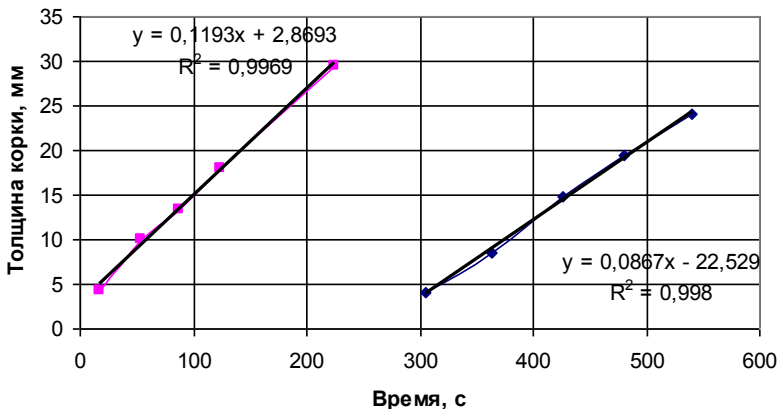


Рис. 3.6 – Зависимость положения фронта кристаллизации от времени затвердевания

Требования к оформлению графической части работы 3

На всех этапах отразить результаты расчетов в виде скриншотов:

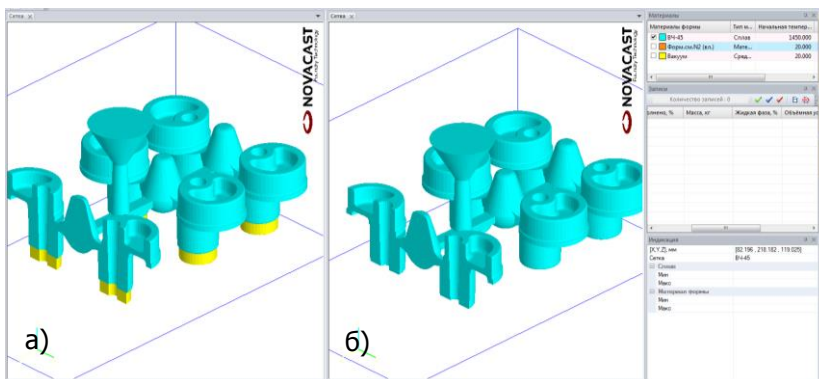


Рисунок – Расположение холодильников в форме: а) - вариант с холодильником; б) - без холодильника

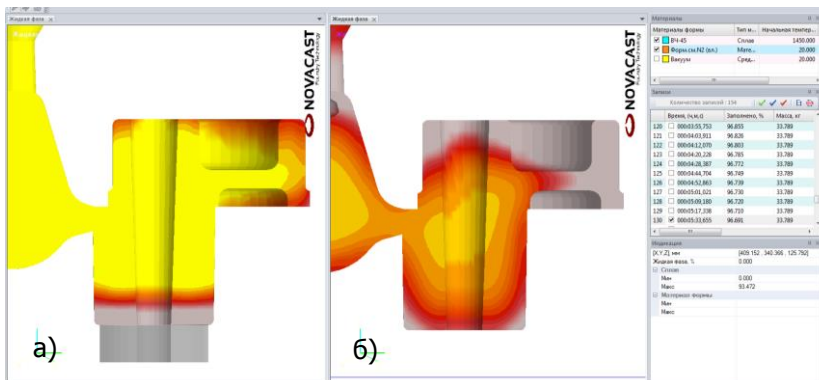


Рисунок – Распределение жидкой фазы в одинаковые моменты времени после заливки металла: а) - вариант с холодильником; б) - без холодильника

Результаты расчета, представленные на рисунках, должны быть снабжены поясняющими комментариями.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ШЛАКОВЫХ ЧАСТИЦ И РАБОТЫ ШЛАКОУЛОВИТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Гидродинамика процесса особенно важна на первом этапе процесса разливки, т.е. когда металл начинает заполнять форму. На этом этапе необходимо, чтобы поток жидкого металла закручивался или, по крайней мере, покачивался, но не слишком сильно, чтобы избежать эрозии металла в форме и посторонних включений внутри металла.

При плохой гидродинамической картине заполнения формы возможно образование дефектов в отливках, таких как:

Ужimina — небольшое утолщение на поверхности отливки, содержащее промежуточный слой формовочного материала. Причины ее образования — слишком медленная скорость заливки формы, неравномерная подача металла, а также перерывы струи.

Спай — немонолитное слияние потоков металла, имеющее вид шва с округленными кромками, уходящее вглубь отливки. Причины его образования — непроваривание металла в месте слияния двух потоков из-за медленного заполнения формы металлом, низкой жидкотекучести металла, заливки тонкой или прерывистой струей.

Газовая раковина — внутренняя или выходящая на поверхность округлая полость размером более 2—3 мм с гладкими стенками. Возникает в отливках при механическом захвате газов элементами литниковой системы при заливке формы.

Шлаковая раковина — неметаллическое включение, имеющее вид и состав шлака (одионого вида или гнезда). Образуется в результате неправильной и небрежной заливки сплава и при недостаточно эффективном удержании шлака в шлаковой чаше литниковой системы.

Песчаная раковина — включения того же вида и состава, что и формовочные материалы. Образуется при разрушении или размыве формы в результате большой скорости потока заливаемого металла.

Появление шлаковых включений бывает вызвано тем, что канал литниковой системы не выполняет одну из своих функций — удерживать вкрапления шлака.

Шлакоуловители служат для задержания шлака и других неметаллических включений, могущих оказаться в расплаве, например, оксидных плен, частиц формовочного материала и огнеупорной футеровки ковша.

Разработка и оптимизация процессов литейного производства

Улавливание шлака может происходить и в коллекторе, если он быстро заполняется металлом и имеет достаточную протяженность, чтобы частицы шлака успели всплыть в верхнюю часть его до попадания в питатель. Это наиболее вероятно при малых скоростях движения расплава в коллекторе, в случае литья тяжелых сплавов (чугуна, стали, латуней и бронз), когда значительно более легкие неметаллические включения быстро всплывают. При литье легких сплавов (алюминиевых, магниевых) этого обычно не происходит и коллектор выполняет только роль канала, подводящего расплав к питателям в горизонтальной плоскости. Поэтому для надежного задержания шлаков и других неметаллических включений при изготовлении отливок из любых литейных сплавов, в литниковой системе выполняют различные специальные шлакоулавливающие устройства, некоторые конструкции которых показаны на рисунке 4.1.

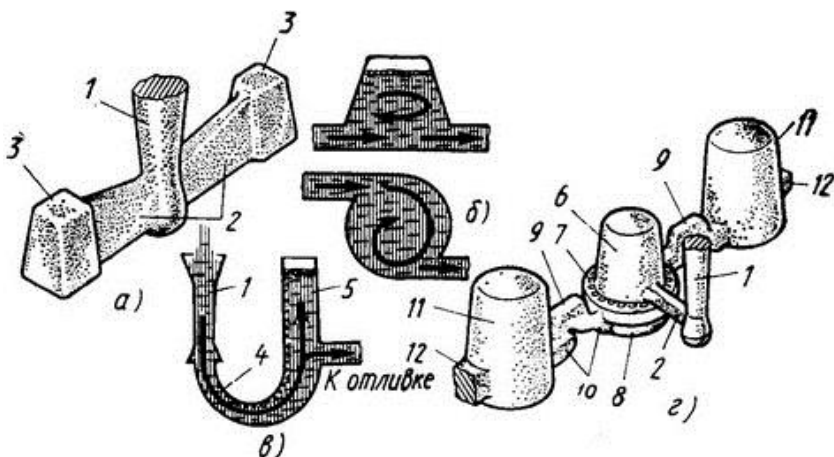


Рис. – 4.1 Шлакоуловители в литниковых системах различной конструкции: а - литниковая система с шлакоулавливающими бобышками, б - схема центробежного шлакоуловителя, в - схема шлакоуловителя с рожковым литниковым ходом и шлаковыпором. г - двусторонняя литниковая система с фильтрующей сеткой, шлакоуловителями и закрытыми отводными прибылями (питающими бобышками); 1 - стояк. 2 - литниковый ход (коллектор), 3 - шлакоулавливающие бобышки, 4 - рожковый литниковый ход, 5 - шлаковыпор, 6 - надсеточный шлакоуловитель, 7 - фильтрующая сетка из стержневой смеси, 8 - подсеточный металлоприемник, 9 - промежуточный шлакоуловитель, 10 - литниковые ходы, 11 - закрытые отводные прибыли (питающие бобышки), 12 - питатели

Краткие теоретические сведения по работе с модулем расчета напряжений в отливке

Для моделирования поведения шлаковых и других частиц в потоке металла при заполнении формы необходимо задать их характеристики в модуле «Начальные условия». Определение частиц производится в меню «Оснастка» - «Пробные частицы ...» после создания модели и задания всех необходимых начальных и граничных условий.

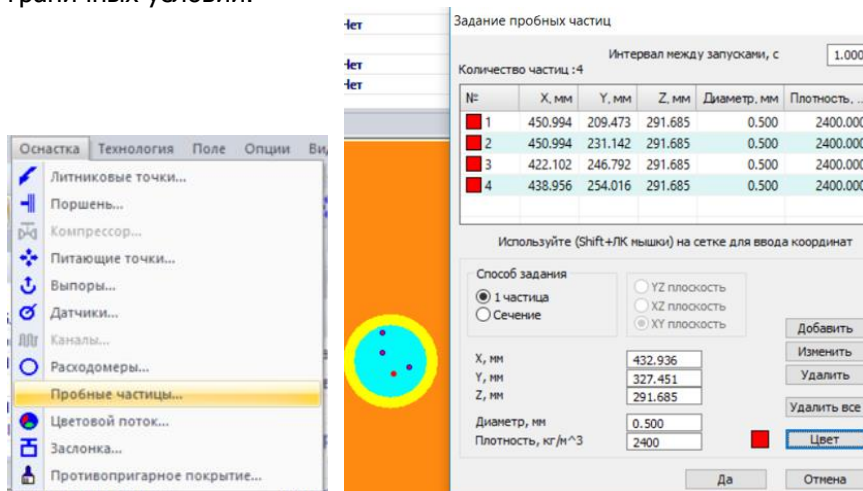


Рисунок 4.2 – Задание характеристик пробных частиц

В меню «Задание пробных частиц» необходимо установить требуемую плотность частиц, их размер и расположение в литниково-питающей системе. Для удобства наблюдения за перемещением частиц, рекомендуется установить их цвет контрастным к цвету, определяющему сплав.

При условии корректного определения всех параметров частиц, при решении задачи гидродинамики и при просмотре результатов появится возможность просмотра траектории перемещения частиц, на основании которой можно судить о вероятности получения таких видов брака как шлаковые частицы и сорные раковины.

Задание 4

Цель: закрепление знаний о типах и причинах появления дефектов, возникающих в процессе заполнения формы жидким расплавом. Получение навыков по моделированию поведения шлаковых частиц в литниково-питающей системе и анализу гидродинамической картины заполнения литейной формы жидким расплавом в среде LVMFlow.

Задание: Провести анализ причин и типов дефектов, возникающих в процессе заполнения формы жидким расплавом.

Выполнить моделирование заполнения заданной отливки с литниково-питающей системой, обеспечивающей на данном этапе наилучшие результаты по значениям выхода годного.

Провести анализ поведения шлаковых частиц в ЛПС, поля скоростей жидкого расплава и среднemasсовой скорости заполнения формы. На основании результатов анализа разработать и произвести моделирование усовершенствованного варианта ЛПС, позволяющего улучшить условия заполнения литейной формы.

Провести сопоставительный анализ исходной и усовершенствованной технологий.

Исходные данные:

1. Отливка – чертеж и требования к отливке выдаются преподавателем.
2. Тип формовки и заливки формы – задается преподавателем в соответствии с чертежом отливки.
3. Характеристики шлаковых частиц и место их проникновения в ЛПС устанавливаются идентичными для всех вариантов моделирования. Диаметр частиц выбрать из диапазона 0,5 – 1,5 мм, плотность 2400 – 2700 кг/м³. Рекомендуемое количество частиц - 10 шт. Место ввода частиц - район узкого участка воронки стояка.
4. Тип и расположение шлакоуловителя выбираются студентом совместно с преподавателем.

Порядок работы 4

1. Выполнить краткий теоретический обзор по следующим вопросам:

- Причины и типы дефектов, возникающих в процессе заполнения формы жидким расплавом;
- Типы и особенности применения шлакоуловителей для

Разработка и оптимизация процессов литейного производства

- повышения качества отливок (сталь, чугун, алюминиевые и бронзовые сплавы);
- Конструкция и требования к шлакоуловителям.
2. В качестве исходной технологии принимается один из вариантов работы по оптимизации выхода годного литья, характеризующийся наихудшими показателями поля усадки.
 3. Во время задания начальных и граничных условий назначить характеристики и место ввода шлаковых частиц.
 4. Произвести моделирование процесса заполнения исходной технологии с вводом шлаковых частиц.
 5. На основании полученных результатов расчета поля скоростей и траекторий движения шлаковых частиц определить максимальные и минимальные среднemasсовыe и мгновенные скорости заполнения отливок. Пример определения этих значений и формирования графической части отчета приведен на рисунках 4.3-4.5. Результаты занести в таблицы 4.1-4.2.

Таблица 4.1. – Сопоставление среднemasсовыx скоростей заполнения отливок

Технология	Масса отливки, кг	Время заполнения отливки, с		Неравномерность заполнения, %	Скорость заполнения, кг/с		Рекомендуемая скорость заполнения (определяется по найденному уровню), кг/с	
		макс	мин		макс	мин	макс	мин
Без шлакоуловителя	3,12	8,1	5,2	36	0,39	0,60	0,30	0,55
С шлакоуловителем Вариант1		6	5,5	8	0,52	0,57		
Соотношение Вариант1		26%	-6%	77	-35%	5%		
С шлакоуловителем Вариант2		6,2	6,2	0	0,50	0,50		
Соотношение Вариант2		23%	-19%	100	-31%	16%		

Таблица 2. – Сопоставление мгновенных скоростей заполнения отливок

Технология	Масса отливки, кг	Максимальная скорость потока в ЛПС, м/с	Макс. скорость потока в полости отливки, м/с	Коэффициент сопротивления ЛПС, %	Доля шлаковых частиц проникших в отливку, %	ВГ, %
Без шлакоуловителя	3,12	0,8	0,5	38	50	52
С шлакоуловителем Вариант1		0,76	0,45	41	10	43
Соотношение Вариант1		5%	10%	-9%	80%	-9
С шлакоуловителем Вариант2		0,71	0,42	41	0	42
Соотношение Вариант2		11%	16%	-9	100%	-10

6. На основании полученных данных оценить вероятность образования характерных литейных дефектов и разработать мероприятия по корректировке потоков скоростей металла в ЛПС с целью улучшения условий заполнения формы.
7. Разработать конструкцию шлакоуловителя и интегрировать его в модель литейного куста.
8. Произвести подготовку и расчет новой технологии при одинаковых с первым вариантом исходных условиях.
9. На основании полученных данных произвести сопоставление исходной и предложенной технологий. Все результаты, в том числе данные по изменению выхода годного, свести в таблицы 1-2. Оценить эффективность и целесообразность применения нового технологического варианта заполнения формы. При необходимости произвести повторное моделирование с корректировкой технологии.
10. Оценить эффективность и целесообразность применения нового технологического варианта заполнения формы. При необходимости произвести повторное моделирование с корректировкой технологии.
11. Сделать выводы о навыках и результатах, полученных в процессе выполнения работы

В выводе отразить полученные в ходе работы новые навыки и знания по применению средств автоматизации в процессе оптимизации литейной технологии и непосредственно полученные в ходе работы результаты.

Пояснения к выполнению работы 4

Анализ полей скоростей производится на основе рассмотрения не менее трех временных срезов процесса заполнения: начало заполнения отливки, средняя фаза и завершение процесса заполнения отливки.

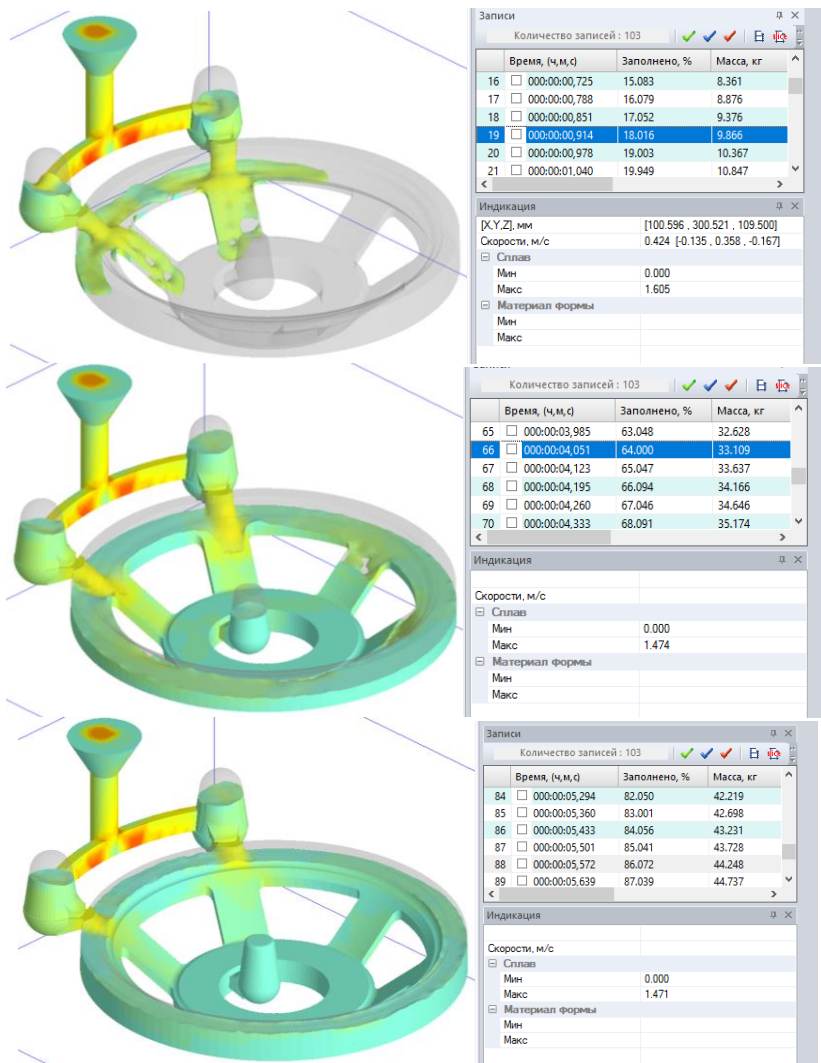


Рис. 4.3 – Определение среднемассовых и локальных скоростей потока металла в форме

Разработка и оптимизация процессов литейного производства

Определение времени заполнения производится на основании визуальной оценки моментов начала и конца заполнения отливок металлом. Поскольку в форме может располагаться несколько отливок, возможен вариант неравномерного их заполнения. Для таких случаев производится оценка самой большой и самой низкой скоростей заполнения, и на основе этого рассчитывается величина неравномерности по уравнению:

$$НЗ = 100(\tau_{\max} - \tau_{\min})/\tau_{\max}, \%$$

где НЗ - неравномерность заполнения, %; τ_{\max} - максимальное время заполнения, с; τ_{\min} - минимальное время заполнения, с

Определение проникновения шлаковых частиц в отливки.

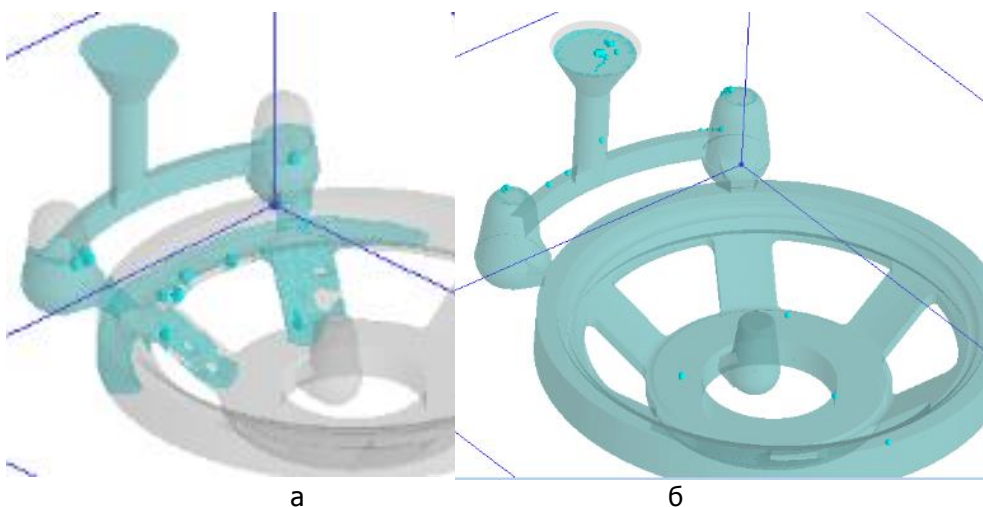


Рис. 4.4 – Определение количества шлаковых частиц, попадающих в полость отливки: а – начальный момент заполнения отливки; б – завершение процесса заполнения отливки

Доля шлаковых частиц, проникших в отливки, определяется как отношение количества частиц, обнаруженных в отливках в момент полного их заполнения к общему заданному количеству частиц.

Определение рекомендуемых минимальной и максимальной скоростей заполнения отливок произвести с помощью аналитических возможностей MS Excel или других электронных таблиц. На

основе точечных данных строится график зависимости массовой скорости заполнения от массы отливок. При построении линии тренда выбрать тип линии - степенная. На основе полученных коэффициентов степенной зависимости произвести расчет максимальной и минимальной рекомендуемых скоростей заливки и сравнить эти значения с результатами моделирования.

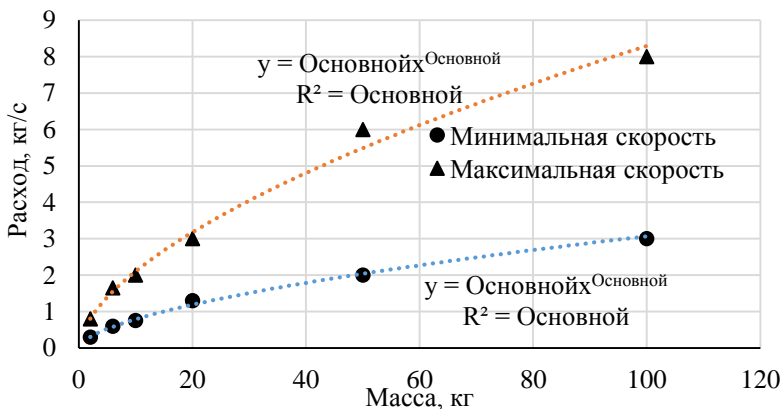


Рис. 4.5 – Зависимость положения фронта кристаллизации от времени затвердевания

Требования к оформлению графической части работы 4

На всех этапах расчетов дополнить представленные выше данные графиком потока металла.

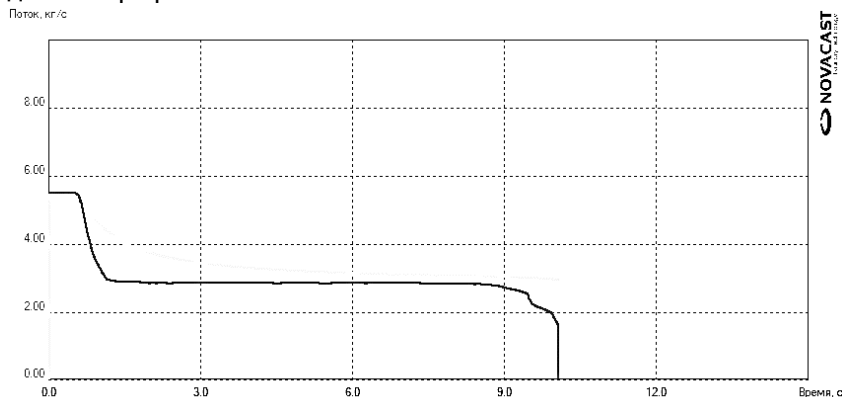


Рисунок – График потока металла во время заливки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Важные особенности систем моделирования // Литейное производство. 2004. № 5. С. 24–30.
2. LVMFlow | [Electronic resource]. URL: <http://lvmflow.ru/> (accessed: 21.05.2017).
3. Рубцов Н.Н. Справочник литейщика. Под. общей редакцией Н.Н. Рубцова. Москва: Машгиз, 1962. 611 с.
4. Василевский П.Ф. Технология стального литья. Москва: Машиностроение, 1974. 406 с.
5. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов. Учеб. пособие для вузов. Л.: Машиностроение, 1976. 216 с.
6. ГОСТ Р 53464-2009 «Отливки из металлов и сплавов допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку»