

Высокоэффективное проектирование литейной технологии фасонной отливки из магниевого сплава.

Часть 2. Прогнозирование и устранение трещин

Рассматривается прогнозирование возникновения и устранение трещин в отливке "рама" из сплава МЛ5пч на основе магния, полученной литьем в песчаную форму. Приведены модель расчета напряжений и результаты расчета напряженно-деформированного состояния отливки в зависимости от конструкции литниково-питающей системы.

Ключевые слова: моделирование, литье, литниково-питающая система, трещина.

The forecasting of occurrence and elimination of cracks in the molding "frame" from the "МЛ5пч" alloy on the basis of magnesium, obtained by casting into a sand mold, is considered. The stress calculation model and the results of calculating the stress-strain state of the casting are presented, depending on the design of the sprue-feeding system.

Keywords: modeling, casting, sprue-feeding system, crack.

В работе [1] рассматривались основные этапы разработки технологии получения отливки "Рама" из легкого сплава на основе магния: выбор литниковой системы, компьютерное моделирование усадочной пористости, изготовление пробной партии отливок и результаты ее контроля. В данной статье рассматриваются: модель расчета напряжений, расчет механических свойств сплава и результаты расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) в зависимости от конструкции литниково-питающих систем (ЛПС). Работа выполнена ООО ПКФ "Технология" совместно с Группой компаний CSoft, которая является разработчиком и дистрибьютором решений в области моделирования литья металлов.

Опытная партия отливок "Рама" изготовлена на одном из предприятий АО "Вертолеты России" из сплава МЛ5пч на основе магния методом гравита-

ционного литья в песчаную форму, изготовленную из холоднотвердеющей смеси по альфа-сет процессу. Отливка представляет собой тонкостенную конструкцию со средней толщиной стенки $8 \div 10$ мм и многочисленными ребрами жесткости (рис. 1, а). Полость формы заполняется расплавом через стояк и два коллектора с щелевыми питателями (рис. 1, б). По мере заполнения отливки заполняется и кольцевая прибыль, предназначенная для компенсации усадки через щелевые питатели. Параметры ЛПС подтверждены моделированием заполнения формы расплавом, затвердевания и формирования усадочной пористости в СКМ ЛП "ПолигонСофт" [2].

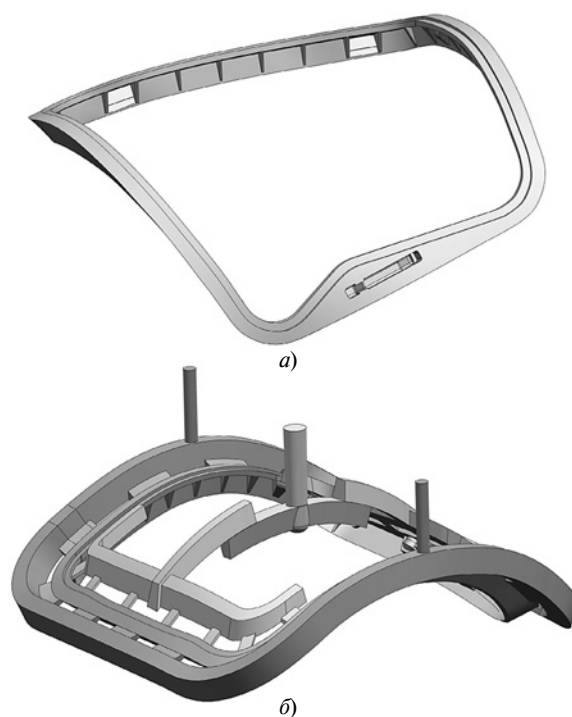


Рис. 1. Модели отливки "Рама" (а) и литейного блока (б)



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 55)

верхности металлов // Вестник Казанского ТУ. 2003. № 1. С. 172—179.

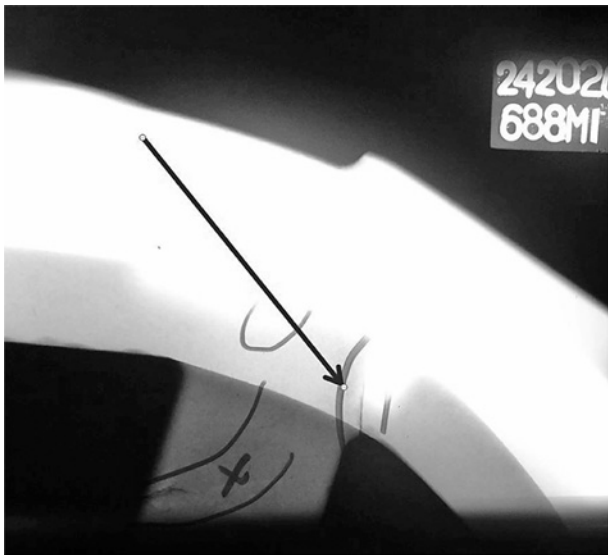
13. **Создание** новых дисперсных композиционных материалов на основе порошковых систем Al-3dM с использованием электрофизической обработки / В. А. Сурков, И. Ш. Абдуллин, А. Ф. Дресвянников и др. // Перспективные материалы. 2013. № 5. С. 79—83.

14. **Сурков В. А.** Механические свойства интерметаллидных материалов на основе системы Fe—Al при воздействии плазмы высокочастотного индукционного раз-

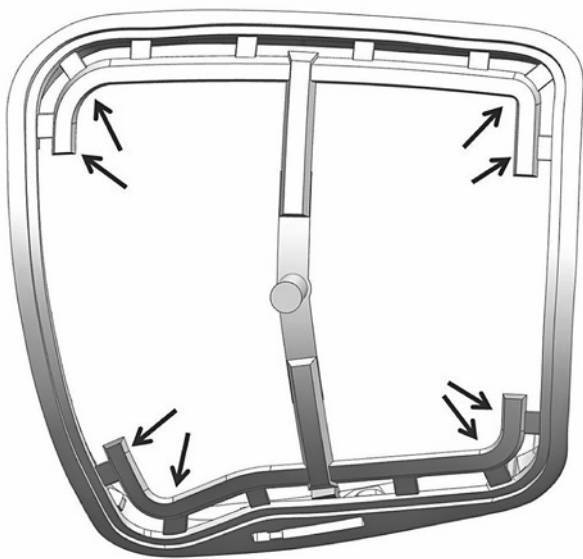
ряда пониженного давления // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 8. С. 41—43.

15. **Сурков В. А.** Создание интерметаллидных композиционных порошковых материалов системы систем Al—3dMe // Вестник двигателестроения. Запорожье АО "Мотор СИЧ". 2013. № 1. С. 121—126.

16. **Сурков В. А.** Анализ структуры и фаз интерметаллических соединений материалов на основе порошковых систем p, d-металлов // Вестник Казанского ТУ. 2013. № 6. С. 33—38.



а)



б)

Рис. 2. Рентгенограмма трещины в отливке "Рама" (а) и расположение трещин в коллекторе (б)

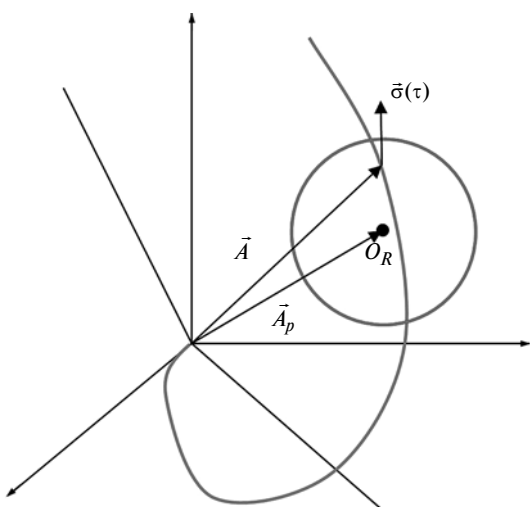


Рис. 3. Пятимерное пространство девиатора тензора деформаций

Исследование отливок подтвердило правильность выбранной конструкции ЛПС по усадочной пористости — отливки успешно прошли рентгенографический контроль. Однако все опытные отливки имели трещины в местах подвода расплава через щелевые питатели (рис. 2, а). При этом щелевые питатели, идущие от отливки к прибыли, подобных дефектов не имели. Трещины образовались в восьми питателях, расположенных в местах сгибов питающих коллекторов, на рис. 2, б показаны стрелками. Для устранения дефектов провели серию дополнительных расчетов. В результате изменили размеры, число и положение этих питателей на коллекторах, изменили и сами коллекторы, через которые подается расплав. На примере данной ситуации покажем, как рассчитать остаточные напряжения в отливке и определить области, в которых они могут привести к разрушению.

Модель расчета НДС отливки, применяемая в СКМ ЛП "ПолигонСофт", разработана коллективом авторов [3] на основании теории малых упругопластических деформаций А. А. Ильюшина [4]. Процесс остывания отливки в форме рассматривается как квазиравновесный, следовательно, для каждого момента времени в отливке и форме выполняются условия равновесия:

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

где σ_{ij} — тензор истинных напряжений Коши, $i, j = 1, 2, 3$.

Для отливки зависимость напряжений σ_{ij} от компонент вектора перемещения и компонент тензора пластических деформаций описывается в соответствии с термоупругопластической моделью материала. Представим компоненты тензора напряжений в виде компонент шарового тензора и девиатора:

$$\sigma_{ij} = S_{ij} + \sigma_0 \delta_{ij}, \quad (2)$$

где $\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$ — среднее напряжение; S_{ij} — девиатор тензора напряжений; δ_{ij} — симметричный символ Кронекера.

Среднее напряжение определяется упругими свойствами материала и рассчитывается по закону Дюамеля — Неймана:

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} \left[\frac{E(T)}{1 - 2\nu(T)} \right] (\Theta - 3\alpha(T)\Delta T), \quad (3)$$

где $\Theta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ — относительное изменение объема частиц; σ_{ij} — компоненты тензора малых деформаций; $E(T)$ — модуль Юнга; $\nu(T)$ — коэффициент Пуассона; $\alpha(T)$ — коэффициент линейного температурного расширения.

В соответствии с принятой теорией механики сплошных сред [4] девиатор тензора напряжений в каждый момент времени τ зависит от процесса деформирования и коллинеарен разности между девиатором тензора текущей деформации и девиатором тензора пластической деформации. Рассмотрим произвольную точку отливки. В начальный момент времени ($\tau = 0, T = \text{const}$) все компоненты тензоров напряжений и деформаций равны нулю. Это состояние соответствует началу координат пятимерного пространства девиатора тензора деформаций на рис. 3. По мере остывания отливки температурное поле теряет свою однородность и компоненты тензора напряжений и деформаций рассматриваемой точки будут отличны от нуля. Состоянию рассматриваемой точки тела в каждый момент времени соответствуют точка пятимерного пространства и радиус-вектор \vec{A} , компоненты которого определяются компонентами девиатора тензора деформаций. Со временем радиус-вектор \vec{A} вычерчивает в пятимерном пространстве кривую I , которая определяет процесс деформации в рассматриваемой точке отливки. Одновременно в каждый момент времени можно построить радиус-вектор \vec{A}_p , соответствующий тензору пластической деформации. Конец вектора \vec{A}_p (точка O_R) соответствует состоянию полной разгрузки в точке тела, где упругие деформации отсутствуют. Вокруг точки O_R существует некоторая область, поверхность 2 которой назовем поверхностью текучести. Предполагается, что если в момент времени τ точка траектории деформаций оказывается внутри поверхности текучести, конфигурацию которой примем сферической, то девиатор S_{ij} тензора напряжений (на рис. 3 ему соответствует вектор $\vec{\sigma}$) имеет вид:

$$S_{ij}(\tau) = 2\mu(T)(e_{ij}(\tau) - e_{ij}^{(P)}(\tau - \Delta\tau)), \quad (4)$$

где e_{ij} — девиатор тензора деформации; $e_{ij}^{(P)}$ — девиатор тензора пластической деформации; $\mu(T) = \frac{R(T)}{2(1+\nu(T))}$ — модуль сдвига.

Если процесс деформирования в векторном пятимерном представлении продолжается в момент времени τ вне поверхности текучести, то девиатор S_{ij} тензора напряжений определяем следующим образом:

$$S_{ij}(\tau) = \frac{2\mu(T)R + U(T)(\varepsilon_{ii} - R)}{\varepsilon_{ii}} \times (e_{ij}(\tau) - e_{ij}^{(P)}(\tau - \Delta\tau)), \quad (5)$$

где $U(T)$ — коэффициент упрочнения; ε_{ii} — интенсивность упругих деформаций; $R = \sigma_T(T)/2\mu(T)$ —

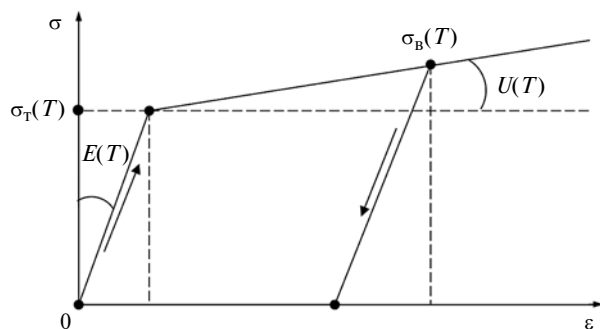


Рис. 4. Аппроксимация экспериментальной кривой $\sigma \sim \varepsilon$

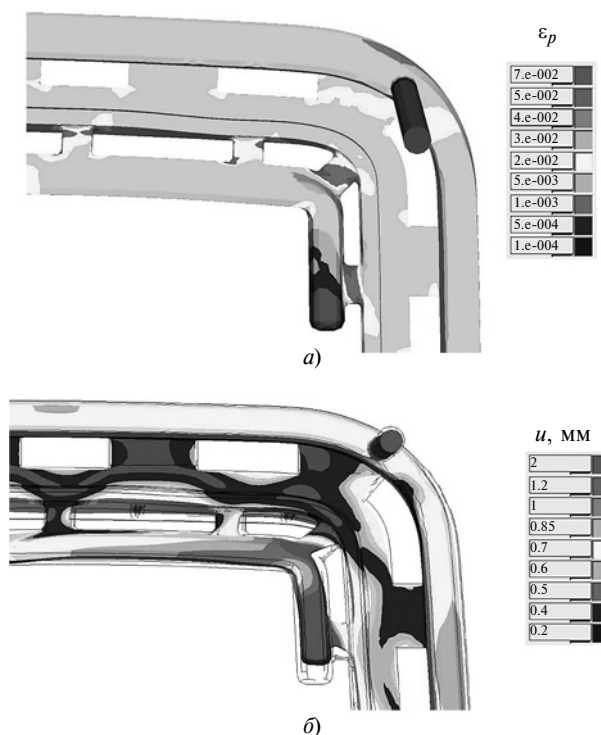


Рис. 5. Результаты расчета НДС отливки:

a — интенсивность пластических деформаций; b — искажение геометрии

радиус поверхности текучести; $\sigma_T(T)$ — предел текучести.

Температурные функции $E(T)$, $\nu(T)$, $\alpha(T)$, $U(T)$ и $\sigma_T(T)$ можно определить экспериментально, например, испытывая образцы материала на одноосное растяжение при разных температурах. Полученные в ходе эксперимента кривые $\sigma \sim \varepsilon$ аппроксимируются двухзвенной ломаной кривой (рис. 4), из которой можно получить необходимые для расчета напряжений характеристики. Однако большинство промышленных испытательных машин не позволяют проводить измерения механических характеристик в двухфазной области, поэтому достаточно популярны специализированные программы или термодинамические базы данных, позволяющие рассчитать требуемые механические свойства в широком диапазоне температур по химическому

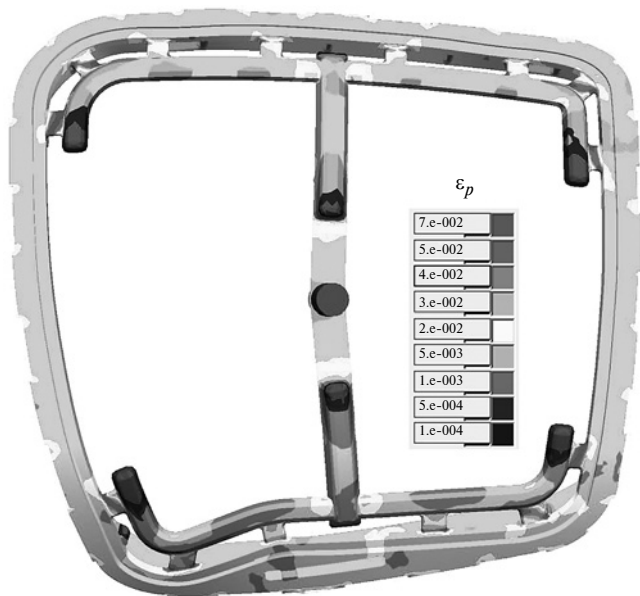


Рис. 6. Интенсивность пластических деформаций в отливке после выбивки из формы и удаления прибыли

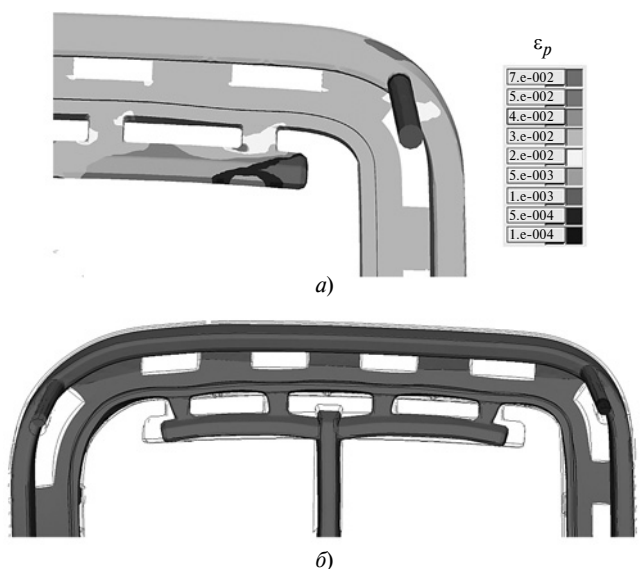


Рис. 7. Результаты расчета НДС скорректированной ЛПС: а — интенсивность пластических деформаций; б — искажение геометрии

составу сплава. Отметим, что достоверность этих расчетов требует проверки, но чаще всего у инженера нет альтернативы. Предполагалось во всех расчетах, что песчаная форма абсолютно жесткая, поэтому для нее не требуется определения механических характеристик.

Расчет НДС разработанной конструкции литейного блока подтвердил наличие зон риска в областях, где обнаружены трещины. Поле накопленной пластической деформации на рис. 5, а показывает, что на два крайних питателя действуют повышенные до 8 % (по сравнению с остальными) дефор-

мации. Оценить эти деформации можно, анализируя поле перемещений (рис. 5, б), которое показывает изменение геометрии отливки относительно исходного состояния (на рисунке оно показано контуром). Для удобства восприятия информации искажение геометрии дано в масштабе 7:1, а поле перемещений и шкала показывают истинные значения. Повышенные деформации приводят к разрушению. То же наблюдается на всех восьми питателях с трещинами (рис. 6).

Проведенный анализ можно считать "калибровкой" модели по экспериментальным данным. При отсутствии таких данных делать выводы об опасном уровне напряжений или деформаций гораздо сложнее, так как сами по себе значения полей (выше они или ниже) не несут никакой информации о возможности разрушения отливки. Более определенный прогноз может дать критерий образования трещин, который реализован в СКМ ЛП "ПолигонСофт", но для его использования нужна зависимость предела прочности от температуры, которая в данном случае неизвестна.

Для устранения дефекта необходимо выбрать такую геометрию питателей и коллектора, которая позволит снизить уровень пластических деформаций и остаточных напряжений, например, до уровня, фиксируемого в питателях без трещин. После проведения серии дополнительных расчетов было найдено решение (рис. 7), которое позволило снизить не только уровень напряжений, но и общий вес литейного блока за счет изменения геометрии питающих коллекторов и сокращения числа питателей.

Проведенные вычисления позволили определить причину возникновения трещин на стыке отливки и ЛПС. Разработана уточненная конструкция литейного блока с более низким уровнем остаточных напряжений, что позволяет получать отливки без дефектов. Подтверждена эффективность математической модели напряженно-деформированного состояния, применяемой в программном комплексе для моделирования литейных процессов "ПолигонСофт".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Монастырский А. В.** Высокоэффективное проектирование литейной технологии фасонной отливки из магниевого сплава. Часть 1. Проектирование и анализ литниково-питающей системы // Вестник машиностроения. 2017. № 3. С. 70–73.
2. **www.polygonsoft.ru.** Система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) "ПолигонСофт"
3. **Александрович А. И., Монастырский А. В., Соловьев М. Б.** Моделирование термоупругопластического прочностного состояния трехмерных изделий // Сообщения по прикладной математике. Вычислительный центр им. А. А. Дородницына. М.: РАН. 2006. 30 с.
4. **Ильюшин А. А.** Механика сплошной среды. М.: Изд-во МГУ, 1978. 286 с.