



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-33-42>
УДК 621.74

Поступила 21.11.2023
Received 21.11.2023

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ОТЛИВОК ДЛЯ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИЗ ФЕРРИТНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

А. Н. ПОДДУБНЫЙ, АО «Инженерный центр ядерных контейнеров»,
г. Москва, Россия, ул. Маршала Мерецкова, 3. E-mail: Anatoliypoddu@yandex.ru

В статье изложены технологические решения отливки заготовок для контейнеров транспортировки ядерных отходов. В качестве примеров предложены расчеты внешних холодильников для решения вопросов направленной кристаллизации отливки. Приведен расчет оптимизации усадочных процессов. Конкретно на фактическом примере представлена картина влияния усадки в процессе заливки и охлаждения заготовки на качество и плотность получаемого материала отливки.

Ключевые слова. Ферритный чугун с шаровидным графитом, кристаллизация отливки, усадка.

Для цитирования. Поддубный, А. Н. Технологические вопросы изготовления ответственных отливок для атомной промышленности из ферритного чугуна с шаровидным графитом /А.Н.Поддубный // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 33–42. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-33-42>.

TECHNOLOGICAL ISSUES OF MANUFACTURING CRITICAL CASTINGS FOR THE NUCLEAR INDUSTRY FROM FERRITIC CAST IRON WITH SPHERICAL GRAPHITE

A. N. PODDUBNY, JSC “Engineering Center for Nuclear Containers”,
Moscow, Russia, 3, Marshala Meretskova str. E-mail: Anatoliypoddu@yandex.ru

The article describes technological solutions for casting blanks for containers for transportation of nuclear waste. As examples, calculations of external refrigerators are proposed to solve the issues of directional crystallization of the casting. Calculation of optimization of shrinkage processes is given. Specifically, the actual example shows a picture of the effect of shrinkage during the casting and cooling of the workpiece on the quality and density of the resulting casting material.

Keywords. Ferritic cast iron with spherical graphite, crystallization of casting, shrinkage.

For citation. Poddubny A. N. Technological issues of manufacturing critical castings for the nuclear industry from ferritic cast iron with spherical graphite. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 33–42. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-33-42>.

Проработка вариантов и технологических особенностей отливки с целью принятия оптимальных решений с применением современных программных комплексов моделирования литейных процессов (рис. 1).

Изготовление формы для отливки корпусов ТУК (транспортно-упаковочный комплект). Базой для формирования всех составляющих формы для отливки корпуса ТУК является специальная жесткая конструкция (рис. 2), которая выполняет ряд основных технологических задач. Эта конструкция формирует литниковую систему, обеспечивающую равномерное заполнение полости формы металлом с гарантированным качеством ламинарным потоком. Представляет собой основу всей литейной формы.

Принимая металл в зумпфы из двух стоячков, литниковая система обеспечивает равномерное перемешивание металла с целью обеспечения гомогенности в теле всей отливки и через 12 питателей подводит жидкий металл сифоном в полость формы.

Следующий этап – наращивание базы под будущий стержень с формированием контура внутреннего края отливки и установка 12 холодильников с технологическими зазорами для компенсации теплового расширения при заливке. При этом перед установкой рабочие поверхности холодильников, контактирующие с жидким металлом, покрывают теплоизолирующей краской на базе цирконового порошка. Затем

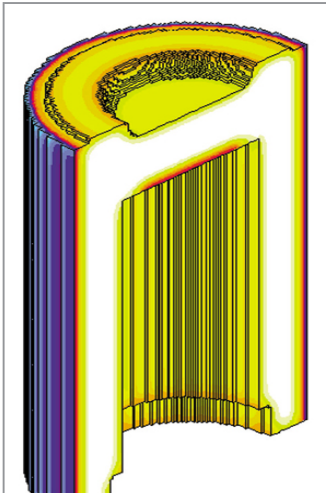


Рис. 1. Математическая модель затвердевания отливки корпуса ТУК (ТУК – транспортно-упаковочный комплект)



Рис. 2. Базовая конструкция формы с литниковой системой

следует подготовка еще одного уровня под основной стержень отливки. Производится установка половинок ящика для набивки основного стержня. При этом четко фиксируется ось стержня и впоследствии всей формы.

В центре стержня устанавливается труба, являясь каркасом конструкции, к которой в верхней части крепятся холодильники по достижению соответствующего уровня набивки тела стержня. Труба в то же время способствует отводу газов, образующихся в процессе заливки формы металлом через нижнюю базовую часть. По периметру трубы в зазор между трубой и рабочей стенкой ящика вводится стержневая смесь, формируя стенку толщиной 150–200 мм.

Поверхность стержня с целью уменьшения пригара покрывается противопригарной краской (рис. 3).

Готовый стержень после окончательной отделки и покраски перемещается в специальный кессон для завершения сборки и заливки. Следующая операция – монтаж кокилей, установка верхней опоки, перекрывающей форму, стояков из керамических втулок в металлических защитных обечайках и установка заливочных чаш (рис.4). Конструкция кокиля состоит из двух цилиндров верхнего и нижнего с замковым соединением. Кокили- цилиндры перед установкой подвергаются интенсивной сушке, дробеметной обработке для устранения следов коррозии и очистке. После подготовительных операций рабочая поверхность покрывается очень эффективным теплоизолирующим покрытием. Покрытие призвано защитить кокиль от приваривания к телу отливки. Как правило, краска используется на основе циркона, но для более быстрой и гарантированной сушки вместо воды используется спирт изопропиловый и часто этиловый (самый эффективный). Окраске кокилей уделяется очень серьезное внимание, толщина кокиля в отливках корпусов ТУК составляет 200 мм. Притом расчетная стойкость кокиля принимается не менее 20 заливок. Тело отливки корпуса ТУК приближается к 500 мм.

Теорией кокильного литья предписывается обратное соотношение: толщина отливки должна быть в 2,5–3,0 раза меньше толщины кокиля. Это является оригинальным технологическим решением. Верхняя опока, перекрывающая всю собранную форму из кокилей, формируется также из стержневой смеси с очень хорошим армированием металлическим каркасом. Оснасткой для верхнего стержня служит специальная круглая опока. В стержень вводится сгораемый жгут для формирования вентиляционного канала в процессе заливки.

В производстве применяются формовочные холоднотвердеющие смеси (ХТС) из кварцевых песков фракции 0,2 мм и связующих на основе фурановых смол. Выбитая отливка (рис. 5) показывает картину подвода металла, остатки от 12 питателей, каркас-трубы стержня, следы от использованных холодильников.

Основные принципиальные технологические вопросы, требующие решения, характерные для отливок подобного типа, следующие:

1. Обеспечить максимально быстрое затвердевание – кристаллизацию отливки (необходимо учитывать, что масса жидкого металла, заливаемого в форму, достигает 160 т.).
2. Все имеющиеся средства должны быть направлены на отвод тепла от поверхности отливки (кокиль, холодильники и др.).



Рис. 3. Стержень, установленный на подготовленную базу



Рис. 4. Собранная форма из кокилей, верхней опоки и стоек из керамических втулок в металлических защитных обечайках и заливочные чаши



Рис. 5. Выбитая из формы отливка после дробеметной очистки

3. Время заполнения формы должно быть не более 2 мин.
4. Температура заливки должна быть как можно ниже.
5. Химический состав и температура заливки должны быть оптимизированы для использования способности металла к максимальному снижению усадочных процессов.

Применение холодильников для решения вопросов получения бездефектных отливок из ВЧШГ

На снимке готовой отливки «корпус отливки ТУК-140» (рис. 6) хорошо видны следы от внешних холодильников, которые были использованы в теле стержня для управления процессом равномерного и ускоренного затвердевания отливки. В донной части – один овальный холодильник в центре и четыре холодильника, представляющие собой сегменты с углом 90° . Вторая группа из 12 холодильников расположена в месте перехода внутреннего цилиндра на больший размер, на выходе из корпуса (место будущей механической обработки под установку крышек). Применение наружных холодильников позволяет обеспечить направленность затвердевания сплава и предупредить образование усадочных явлений и трещин в различных сочленениях стенок и местах скопления металла (тепловых узлах). Холодильники, как правило, применяются для регулирования скорости затвердевания различных частей отливки с целью достижения принципа равномерного или одновременного затвердевания. Необеспечение направленного затвердевания, связанное с этим недостаточное питание тепловых узлов, вызывают развитие междендритной пористости в таком пределе, при котором она переходит в усадочную рыхлость и приводит к понижению прочностных и пластических свойств в отливке и способствует формированию значительных линейных напряжений.



Рис. 6. Выбитая отливка со следами применяемых холодильников

Конструкция внешних холодильников формируется исходя из следующих основных положений. Масса холодильника рассчитывается из теплового баланса конкретного теплового узла и холодильника. Количество тепловой энергии, приносимой жидким металлом, не должно способствовать расплавлению холодильника. Рабочая контактная поверхность холодильника выполняется по геометрии проектируемой заготовки и, как правило, защищается теплоизолирующим покрытием, толщина и материал которого выбирают из конкретных условий. Расчет различных холодильников (плоских, угловых, внутренних, наружных) для сталей и чугунов выполняется в составе автоматизированной системы «Моделирование объемного и направленного отверждения».

В качестве примера приводится расчет объема и определяются размеры холодильника, встраиваемого в центральный стержень. Выбирается нижний пояс отливки. Некоторая особенность поставленной задачи состоит в том, что отливка отливается в кокиль с использованием стержня из ХТС. Анализ

процесса затвердевания отливки и распределение температурных полей показывают необходимость увеличения скорости отвода тепла из этой зоны, от нижней границы 250–300 мм для избежания формирования усадочных рыхлот. Повышенные требования к качеству металла в этом месте вызваны тем, что здесь расположены отверстия крепежа крышек контейнера.

Расчет объема холодильника, необходимого для обеспечения качественной отливки корпуса ТУК, проводится по методике, изложенной в [1].

Назначением наружного холодильника, размещаемого в определенном месте формы, является увеличение скорости охлаждения и затвердевания металла путем повышения интенсивности отвода тепла. Продолжительность затвердевания отливки в зоне расположения холодильника в среднем сокращается. При этом благодаря существенному сужению ширины двухфазной зоны в затвердевающей отливке одновременно улучшается и питание ее металлом, который поступает по тепловой оси отливки и в меньшей мере тормозится дендритами. Холодильник должен за относительно короткое время отвести от поверхности контакта с залитым металлом теплоту перегрева $Q_{ж}$, скрытую теплоту кристаллизации $Q_{к}$, а также частично теплоту, выделяемую затвердевшей отливкой при снижении ее температуры $Q_{т}$: $Q_{\Sigma} = Q_{ж} + Q_{к} + Q_{т}$ [1]. Холодильник, предназначенный для отвода суммарного количества теплоты Q_{Σ} , должен иметь соответствующий объем и теплоемкость. При расчете исходим из следующего теплового баланса [1]:

$$V_x \rho_x c_x (T_x - T_0) = V_M \rho_M c_{мж} (T_3 - T_{лик}) + V'_M \rho_M L + V'_M \rho_M c_{мт} [T_{лик} - (T_{лик} - 10)],$$

где V_x – объем холодильника, м³; ρ_x – плотность холодильника, кг/м³; c_x – удельная теплоемкость холодильника, кДж/(кг·К); T_x – конечная температура холодильника, °С; T_0 – начальная температура холодильника, °С; ρ_M – плотность сплава, кг/м³; $c_{мж}$ – удельная теплоемкость расплава, кДж/(кг·°С); T_3 – температура заливки сплава, °С; $T_{лик}$ – температура ликвидуса, °С; V'_M – объем части отливки, из которой отводится тепло, м³; L – удельная скрытая теплота плавления сплава, кДж/кг; $c_{мт}$ – удельная теплоемкость твердой фазы, кДж/(кг·°С).

Отсюда определяем необходимый объем холодильника [1]:

$$V_x = \frac{V'_M \rho_M \{c_{мж} (T_3 - T_{лик}) + L + c_{мт} [T_{лик} - (T_{лик} - 10)]\}}{\rho_x c_x (T_x - T_0)} T_{лик}.$$

Температура, при которой рассматриваем тепловой баланс, принимается на 10 °С ниже температуры ликвидуса, температура затвердевшей стенки очень малая величина и существенно не окажет влияния на результат расчета. Поэтому ее можно опустить и, таким образом, упростить уравнение. В качестве конечной температуры холодильника рекомендуется принять половину температуры заливки $T_x = T_3/2$, так как способность холодильника отбирать теплоту из отливки при нагреве его выше этой температуры уже значительно снижается [1]:

$$V_x = \frac{V'_M \rho_M [c_{мт} (T_3 - T_{лик}) + L]}{\rho_x c_x \left(\frac{T_3}{2} - T_0\right)}.$$

Практикой установлено, что слишком сильно увеличивать толщину холодильника нецелесообразно. Существует «критическая» толщина холодильника, которая равна примерно половине общей толщины охлаждаемого узла и не превышает 2/3 его толщины.

Принимаемые величины:

V_x – объем холодильника, м ³	–
ρ_x – плотность холодильника, кг/м ³	7200
c_x – удельная теплоемкость холодильника, кДж/(кг·°С)	0,585
T_x – конечная температура холодильника, °С	660,5
T_0 – начальная температура холодильника, °С	20
ρ_M – плотность сплава, кг/м ³	6900
$c_{мж}$ – удельная теплоемкость расплава, кДж/(кг·°С)	0,800
T_3 – температура заливаемого сплава, °С	1321,0
$T_{лик}$ – температура ликвидуса, °С	1260,0
V'_M – объем части отливки, из которой отводится тепло, м ³	–
L – удельная скрытая теплота плавления сплава, кДж/кг	270
$c_{мт}$ – удельная теплоемкость твердой фазы, кДж/(кг·°С)	0,585

Определяем объемную часть тела отливки для ускоренного затвердевания. Диаметр внутренней полости корпуса за вычетом припуска на механическую обработку принимается равным $1460 - 80 = 1380$ мм, или 1,38 м.

Высоту зоны определяем в 250 мм или 0,25 м.

Толщина слоя принимается в 200 мм или 0,20 м.

Половина толщины стенки корпуса, так как наружная сторона подвержена ускоренному охлаждению от контакта с кокилем, составляет:

$$V'_M = 1,38 \cdot 3,14 \cdot 0,25 \cdot 0,2 = 0,216 \text{ м}^3.$$

Рассчитываем объем и массу необходимой группы холодильников:

$$V_x = \frac{0,216 \cdot 6900 \left[0,585(1321 - 1260) + 270 \right]}{7200 \cdot 0,585 \left(\frac{1321}{2} - 20 \right)} = 0,169 \text{ м}^3.$$

Учитывая, что зона для охлаждения имеет значительную протяженность, количество холодильников принимается 12. Объем одного холодильника составляет:

$$V_{x1} = \frac{0,169}{12} = 0,014 \text{ м}^3.$$

Масса одного холодильника из чугуна составляет:

$$0,014 \cdot 7200 = 101,4 \text{ кг}.$$

Конструктивно стенка холодильника, прилегающая к телу отливки, принимается равной 120 мм (рис. 7). На рис. 8 показано размещение холодильника в теле стержня формы.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом подвержен, как и все сплавы, образованию усадочных раковин и пористости в процессе затвердевания и последующего охлаждения отливки [1].

При этом процесс линейной и объемной усадки имеет некоторую своеобразную особенность. В отличие от большинства сплавов чугун с шаровидным графитом перед усадкой претерпевает значительное

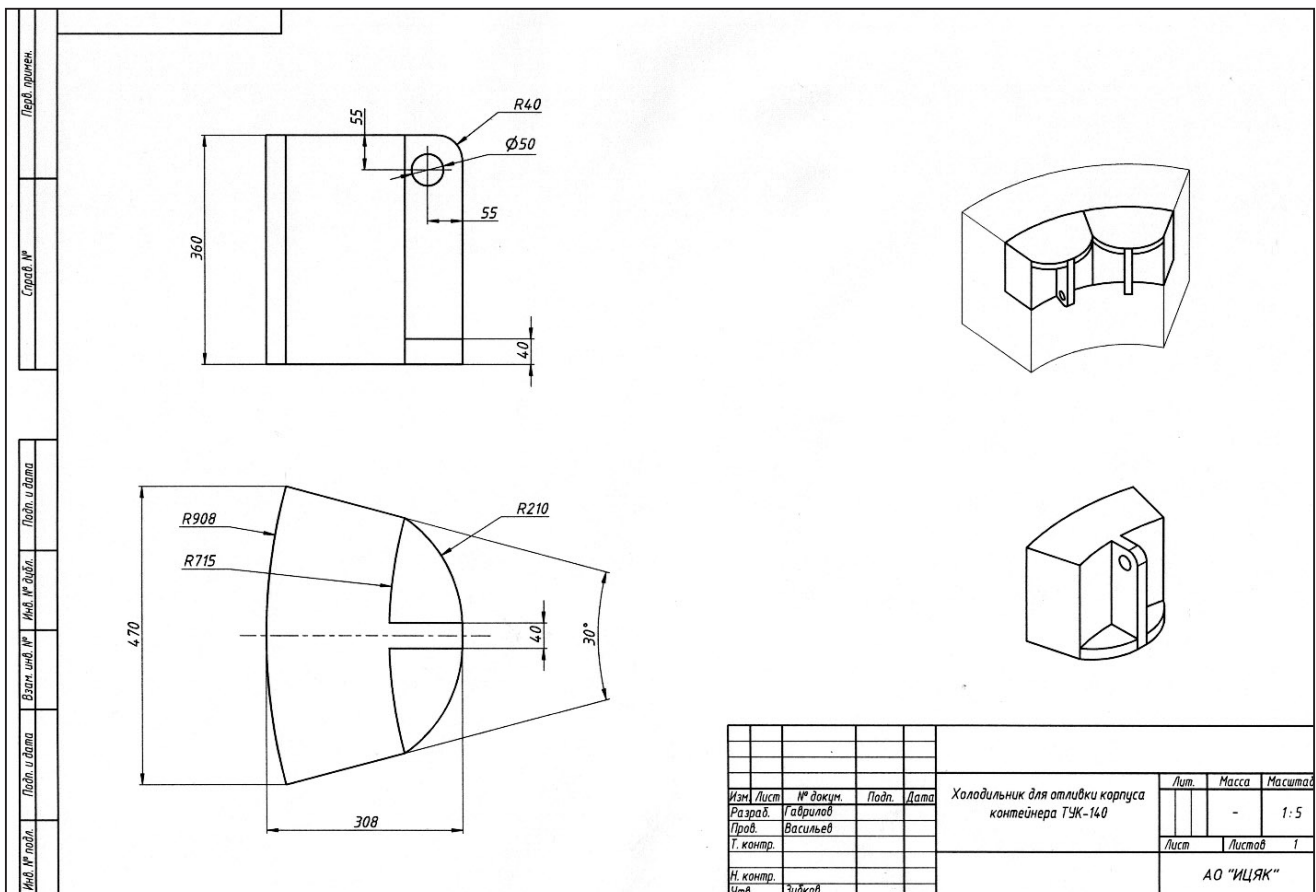


Рис. 7. Конструкция холодильника

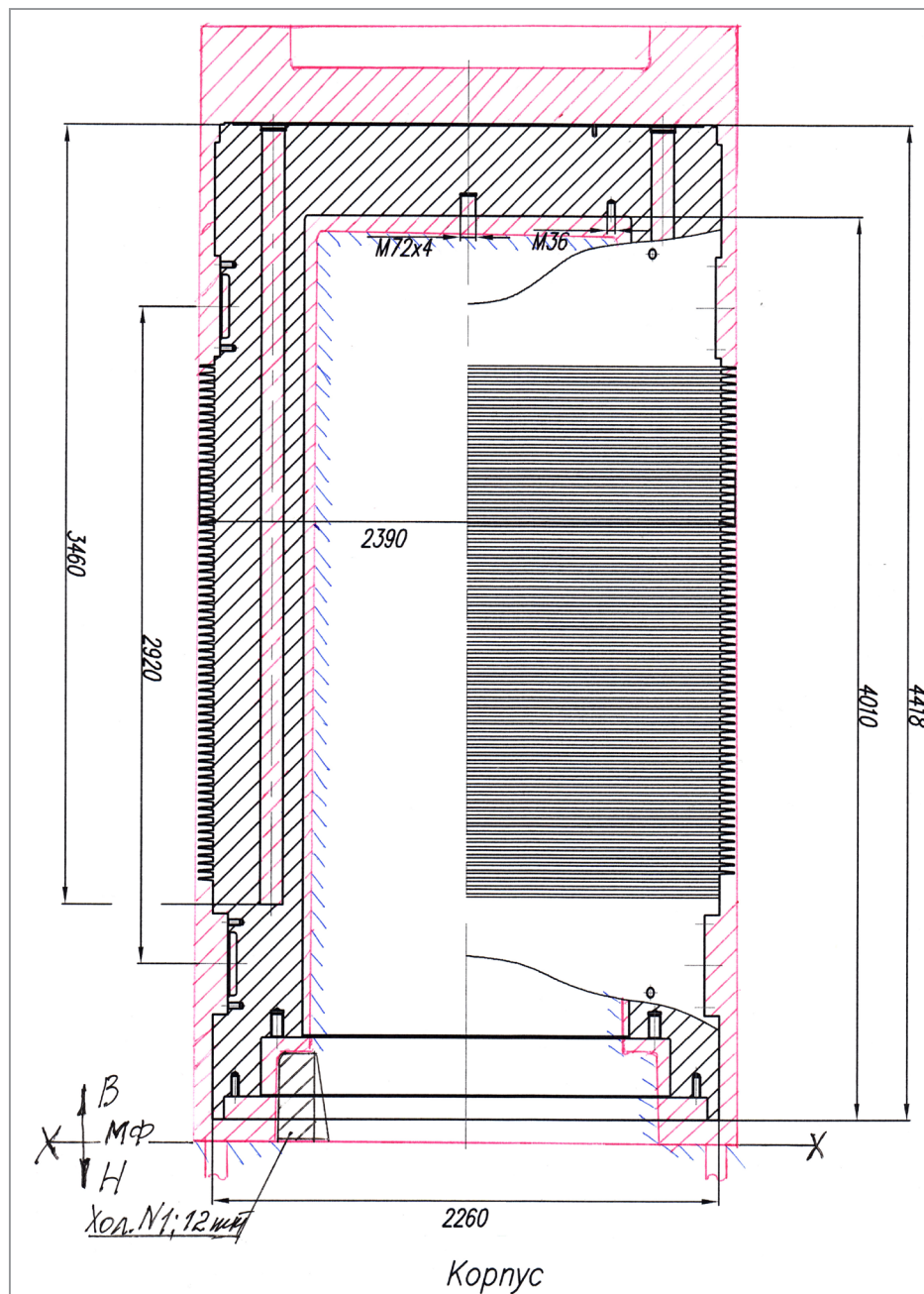


Рис. 8. Размещение холодильника в теле стержня для отливки ТУК-140

предусадочное расширение. Рассмотрим вопросы, связанные с величиной линейной усадки в процессе формирования отливки [2]. Кривые изменения свободной линейной усадки показаны на рис. 9.

Чугун с шаровидным графитом демонстрирует уникальную способность увеличиваться в размерах перед началом усадки при падении температуры [3, 4]. Последовательность усадки определяется процессами, происходящими в отливке начиная от кристаллизации и остывания до температуры среды. Таким образом, величина общей линейной усадки определяется четырьмя составляющими этапами (рис. 10) [2]:

$$E_{\text{общ}} = -E_{\text{п.р}} + E_{\text{д.п.у}} - E_{\text{пер.р}} + E_{\text{п.п.у}},$$

где $E_{\text{общ}}$ – общая усадка сплава в отливке; $E_{\text{п.р}}$ – предусадочное расширение, связанное с выделением из расплава первичного графита; $E_{\text{д.п.у}}$ – доперлитная усадка; $E_{\text{пер.р}}$ – расширение при эвтектоидном перлитном превращении, связанное с выделением из состава распадающегося аустенита, вторичного графита и формированием ферритной матрицы; $E_{\text{п.п.у}}$ – послеперлитная усадка.

В процессе кристаллизации между температурами ликвидус и солидус происходит формирование твердой фазы с выделением аустенита и первичного графита, что обеспечивает первое предусадочное расширение, в данном случае оно может достигать величины 0,6%.

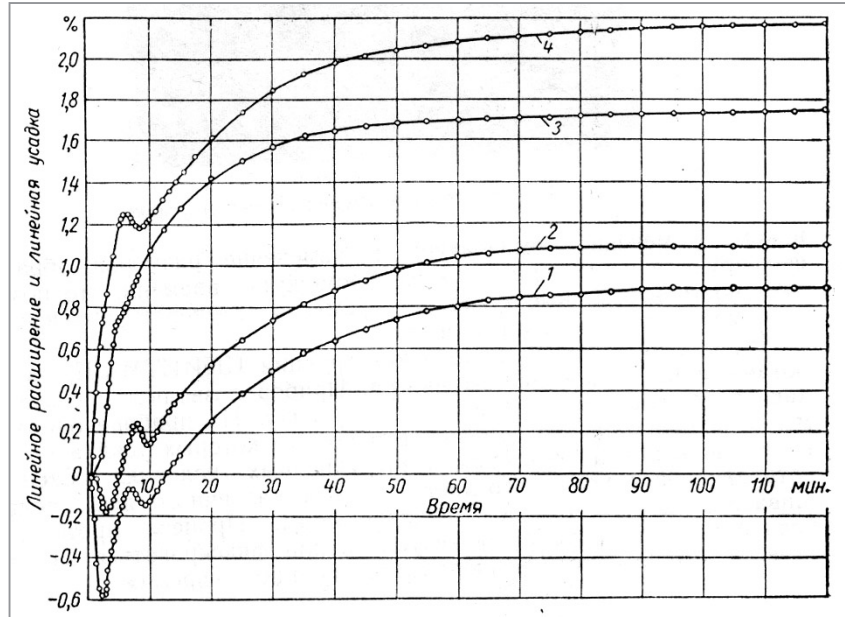


Рис. 9. Изменение свободной линейной усадки различных чугунов и углеродистой стали:
 1 – чугун с шаровидным графитом; 2 – чугун с пластинчатым графитом;
 3 – чугун, обработанный магнием, без ферросилиция (белый чугун); 4 – углеродистая сталь

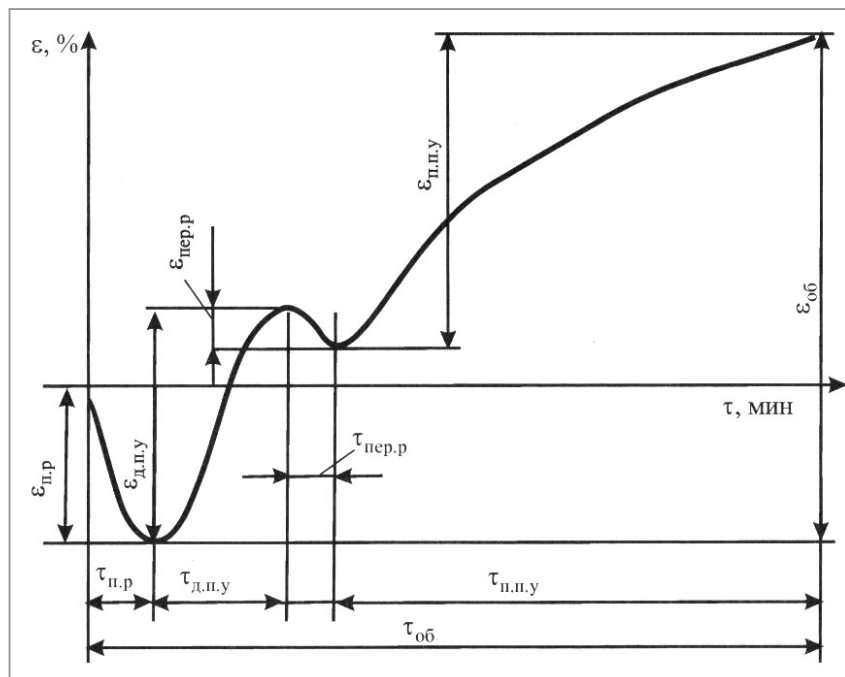


Рис. 10. Схема процесса линейной усадки по четырем этапам

Второе расширение связано с выделением вторичного графита при эвтектоидном перлитном превращении $T=727\text{ }^{\circ}\text{C}$ и может иметь величину до 0,03 %

Между этими этапами усадка характеризуется величиной 0,55 % и ниже температуры эвтектоидного превращения сплава ($T=727\text{ }^{\circ}\text{C}$), до температуры окружающей среды величина усадки составляет 0,95 %.

Таким образом, общая усадка $E_{\text{общ}}=0,87\%$ – это теоретическая величина, которая характеризует общую картину, но не учитывает еще достаточно много мелких факторов, на практике величина усадки чугуна с шаровидным графитом с указанными параметрами (химическим составом) будет стремиться к 0,97–1,05 %, что примерно соответствует параметрам серого чугуна и обеспечивает получение отливки без усадочных дефектов.

Химический состав высокопрочного чугуна в отливках заготовок в среднем составляет: С – 3,65%; Si – 2,03; Mn – 0,13; P – 0,018; S – 0,006; Cu – 0,01; Ni – 0,5; Cr – 0,02; Mg – 0,048; Co – 0,007%.

Рассчитываем величину углеродного эквивалента этих сплавов. Чугун в принятых отливках приближается к эвтектическому [1]:

$$C_3 = C + 0,30Si + 0,33P + 0,40S + 0,25Cu + 0,07Ni - 0,03(0,04) Mn.$$

В нашем случае

$$C_3 = 3,65 + 0,32 \cdot 2,03 + 0,33 \cdot 0,018 + 0,40 \cdot 0,006 + 0,25 \cdot 0,01 + 0,07 \cdot 0,5 + 0,03 \cdot 0,13 = 4,308.$$

Зависимость линейной усадки от величины углеродного эквивалента показана на рис. 11 [3].

Очень важным моментом в управлении процессом усадки является скорость охлаждения отливки начиная с процесса кристаллизации (рис. 12) [3].

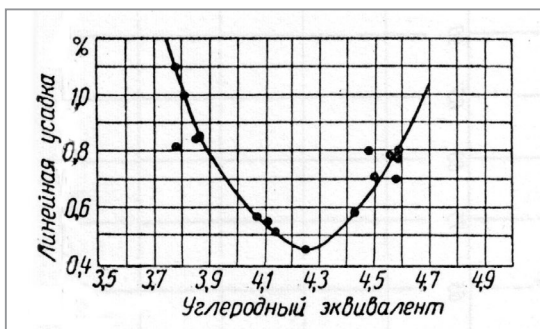


Рис. 11. Линейная усадка в зависимости от величины углеродного эквивалента [3]

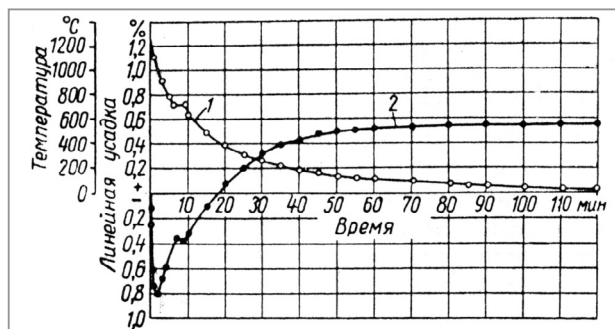


Рис. 12. Кривые охлаждения (1) и свободной линейной усадки (2) чугуна с шаровидным графитом, близкого к эвтектическому составу [3]

Химический состав металла для корпуса ТУК следует подбирать так, чтобы обеспечить минимальную линейную усадку отливки.

Влияние легирующих элементов на количество усадочных дефектов в чугуне связано в основном с их влиянием на процесс графитизации. Особенно большое развитие усадочные раковины получают при полном торможении графитизации, когда чугун затвердевает белым. Поэтому введение элементов (медь, никель, кремний и др.), способствующих графитизации, приводит к уменьшению объема усадочных раковин [2]. Существенную роль в усадочных процессах играет соотношение содержания кремния и остаточного магния (рис. 13) [3, 5].

Приведенные данные показывают, что выбранный химический состав высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (данные из сертификатов) максимально способствует минимизации усадки в получаемой отливке. Дополнительным фактором снижения усадки выступает температура заливки с минимальным уровнем перегрева расплава 1321–1350 °C. Указанный состав сплава высокопрочного чугуна с шаровидным графитом обеспечивает высокие эксплуатационные свойства изделия, прочность, пластичность и полностью решает вопросы получения бездефектной отливки, при этом снимает необходимость дополнительной термической обработки и применения больших габаритных прибылей.

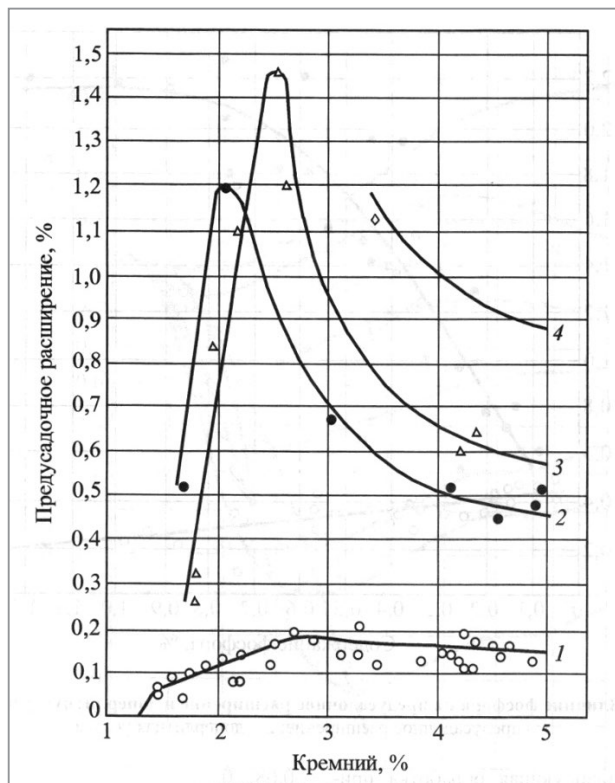


Рис. 13. Зависимость содержания кремния на величину предусадочного расширения от остаточного содержания магния в отливке:
1 – ЧПГ; 2 – ЧШГ с 0,03 % Mg;
3 – ЧШГ с 0,04 % Mg; 4 – ЧШГ с 0,05 % Mg

ЛИТЕРАТУРА

1. **Чернышов, Е.А.** Теоретические основы литейного производства, теория формирования отливки / Е.А. Чернышов, А.И. Евстигнеев. – М.: Машиностроение, 2015.
2. **Гиршович, Н.Г.** Справочник по чугуному литью / Н.Г. Гиршович. – Л.: Машиностроение, 1978.
3. **Клочнев, Н.И.** Усадка чугуна с шаровидным графитом / Н.И. Клочнев. – М.: Машгиз, 1957.
4. **Александров, Н.Н.** Энциклопедия / Н.Н. Александров, Г.Г. Мухин, А.А. Беляков. – М.: Энциклопедия, 2000 .
5. Производство отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / А.А. Беляков [и др.]. – М.: Машиностроение, 2010.

REFERENCES

1. **Chernyshov E.A., Evstigneev A.I.** *Teoreticheskie osnovy litejnogo proizvodstva, teorija formirovaniya otlivki* [Theoretical foundations of foundry production, theory of casting formation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2015.
2. **Girshovich N.G.** *Spravochnik po chugunному lit'ju* [Guide to Iron Casting]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1978 g.
3. **Klochnev N.I.** *Usadka chuguna s sharovidnym grafitom* [Shrinkage of nodular cast iron]. Moscow, MASHhGIZ Publ., 1957.
4. **Aleksandrov N.N., Muhin G.G. Beljakov A.A.** *Jenciklopedija Mashinostroenie* [Encyclopedia. Mechanical Engineering]. Moscow, Jenciklopedija Publ., 2000.
5. **Beljakov A.A., Zhukov A.A., Maccarelli D., Beljakov A.A.** *Proizvodstvo otlivok iz vysokoprochnogo chuguna s sharovidnym grafitom* [Production of castings from high-strength nodular cast iron]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010.