

Особенности литья высокопрочного чугуна в вакуумируемые формы

Особенность литья в вакуумируемые формы обусловлена воздействием вакуума на металл отливки, способствующим ускоренному образованию её поверхностного слоя с измельчением структурных составляющих. Незначительное снижение твёрдости ВЧ отливки в целом предложено компенсировать применением медно-магниевого лигатур, пример выплавки которых в условиях литейного цеха описан в статье.

Ключевые слова: вакуумируемая форма, высокопрочный чугун, лигатура, модифицирование, вакуум, точность отливки, сбережение металла

Повышающиеся требования к качеству, рост механических и эксплуатационных свойств металлоизделий в машиностроении требуют разработки новых эффективных способов управления процессами структурообразования при их получении, так как именно структура материала определяет его свойства. Однако выбор материалов базируется не только на критериях соответствия заданным свойствам, но и на экономии материальных и энергетических ресурсов в совокупности с экологической безопасностью на всех этапах жизненного цикла изделия, начиная от производства и заканчивая утилизацией. Традиционные железоуглеродистые сплавы все чаще заменяются цветными или композиционными материалами, которые, несмотря на более высокую стоимость, обладают меньшей плотностью и большей эксплуатационной стойкостью.

Применяемые в машиностроении Fe-C сплавы – стали и чугуны – отличаются сравнительно низкой себестоимостью и высокими потребительскими свойствами, и конкурентоспособность изделий из сталей и чугунов можно улучшить путем повышения механических и эксплуатационных характеристик. В настоящее время разработано большое количество технологических способов, обеспечивающих улучшение свойств Fe-C сплавов, в большинстве своём они направлены на совершенствование структуры материалов.

Сравнительный анализ двух основных типов Fe-C сплавов показывает, что чугун обладает лучшими литейными свойствами, чем сталь, это позволяет получать готовые изделия непосредственно из литого состояния. Зачастую масса деталей из чугуна ниже, чем стальных, что объясняется присутствием в структуре графитовой фазы. Графитовые включения в структуре чугуна способствуют повышению демпфирующей способности, теплопроводности, коррозионно- и износостойкости изделий.

Однако графитовая фаза оказывает не только положительное, но и отрицательное воздействие на свойства чугуна. Графитовые включения, выступая в роли концентраторов напряжений, ослабляют металлическую матрицу, уменьшая механические свойства. Снизить отрицательное влияние включений графита можно за счёт уменьшения их размеров

и более равномерного их распределения в объёме металлической матрицы. Изменяя форму графитовых включений, их распределение и количество, в сочетании с рациональным структурированием металлической матрицы, можно эффективно управлять конечными свойствами чугуна [1].

Металлическая матрица в значительной степени определяет механические и эксплуатационные свойства литейных чугунов. Особенно очевидным это становится в чугунах с шаровидной формой графита – марок ВЧ (ДСТУ 3925-99), где негативная разупрочняющая роль включений как концентраторов напряжений нивелируется их сферической формой. Для получения шаровидной графитовой фазы высокопрочного чугуна используют технологию модифицирования, наиболее широко применяя для этого модификаторы типа Fe-Si-Mg.

В свою очередь, технология литейной формы существенно влияет на качество отливок, определяет принципы, которыми следует руководствоваться при конструировании отливок и выборе оптимального процесса их производства. Технологична такая конструкция литой детали, при которой можно изготовить отливку, отвечающую требованиям, предъявляемым к точности, шероховатости поверхности, физико-механическим свойствам и структуре металла при наименьших затратах на производство, включая издержки при последующей механической обработке.

В процессе отработки технологии литья из ВЧ 500-2 (ДСТУ 3925-99) корпусов распределителей гидросистем экскаваторов провели измерение размеров моделей и отливок, полученных в песчаноглинистые формы (ПГФ) по-сырому и песчаные вакуумируемые формы (ВФ) по ЛГМ-процессу (таблица).

Результаты обмеров свидетельствуют, что отливки, полученные в ВФ, имеют усадку по всем размерам ~1 %, а отливки, полученные в ПГФ, практически не отличаются от модели. Измеряли среднюю массу отливки, которая в ПГФ равнялась $93,9 \pm 1,2$ кг, а в ВФ $86,4 \pm 1,0$ кг. Отливки в ПГФ получали с двумя прибылями, масса металла, ушедшая из прибылей и стояка (при опускании в них уровня металла после заливки) на питание таких отливок, составляла $6,4 \pm 0,5$ кг, что соответствует измеренной разности

Размеры отливок корпусов распределителей, полученных в ПГФ и ВФ

| отливки по чертежу | Размеры, мм | | | | Линейная усадка, мм | |
|--------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------|-----------|-------------------------|---------|
| | модели | | отливки, полученной | | в ПГФ | в ВФ |
| | металлические для ПГФ | пенополистироловые для ВФ | в ПГФ | в ВФ | | |
| 516±2,5 | 518,1±0,5 | 518,8±0,5 | 517,8±1,5 | 513,1±1,0 | Практически отсутствует | 5,0±1,5 |
| 312±2,0 | 312,4±0,5 | 313,0±0,5 | 311,0±1,2 | 309,7±1,0 | | 3,3±1,5 |
| 141±1,5 | 140,8±0,3 | 141±0,3 | 142,7±1,0 | 140,0±0,8 | | 1,5±1,1 |

масс отливок, полученных в сравниваемых формах. При этом расширение полости ПГФ в контакте с жидким и затвердевающим металлом происходит, прежде всего, благодаря миграции воды в толщу формы по известному механизму создания переувлажнённой зоны малой прочности, частичной деструкции связующего, давлению столба металла и действию предусадочного расширения ВЧ. Поэтому линейная усадка, как разница средних размеров моделей и отливок, практически отсутствовала при ПГФ.

Отливки в ВФ получали без прибылей, которые заменили выпорами [2, 3]. Благодаря прочности уплотнённого вибрацией до максимальной плотности сухого вакуумируемого песка стенки ВФ не деформируются при контакте с металлом от его металлостатического давления и предусадочного расширения. Благодаря присасывающему действию вакуума формы на металл практически исчезает газовый зазор между металлом и формой и ускоренно образуется корка толщиной 6-8 мм. Её прочность и прочность формы способствуют удержанию без расширения отливки в ускоренно образуемой внешней металлической оболочке при затвердевании большей части металла в центральных частях стенок отливки. На момент полного затвердевания предусадочным расширением ВЧ, связанным с выделением графита, компенсируются усадочные процессы, связанные прежде всего с усадкой жидкой фазы, обеспечивая затвердевания отливки без усадочных раковин и пористости.

Указанная выше особенность – ускоренное затвердевание поверхностного слоя отливки, иногда на глубину её стенки до 8 мм, в результате воздействия вакуума на металл закономерно отражается на структуре поверхностного слоя (рис. 1), которая характеризуется в 4-5 раз более мелкими включениями графита, чем в среднем по телу отливки, а так-

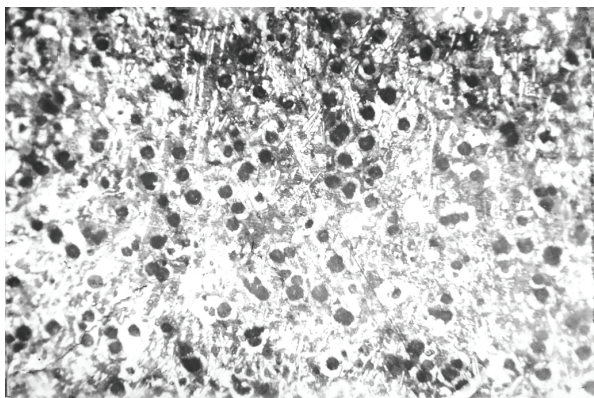


Рис. 1. Структура ВЧ500-2 отливки моноблочного гидрораспределителя по сечению на расстоянии 2,5 мм от поверхности отливки, полученной в ВФ, $\times 100$

же значительным содержанием феррита (до 80 %) с твёрдостью металла не выше 180 НВ при твёрдости в среднем по сечению стенок отливки – около 200 НВ. Такое сочетание преимущественно ферритной матрицы с мелкими и частыми включениями графита подробнее описано для тонкостенного литья в контакте с ВФ и пристеночных слоев чугуновых отливок в статье [4].

Линейная усадка, прошедшая в твёрдом состоянии, видна на размерах отливок с применением ВФ (таблица) и её следует учитывать при изготовлении модели. Разница по массе отливок (средняя масса отливки 93,9 кг при ПГФ) по двум рассмотренным формовочным процессам до 7,5 кг позволит только за счёт сокращения расхода жидкого металла сэкономить при переходе от ПГФ к ВФ $7,5 \times 1000 / 93,9 \approx 80$ (кг) металла на 1 тонне отливок и ещё позволит сократить припуски на механообработку с учётом повышения точности отливок.

Рассмотренный пример может служить одним из аргументов для обоснования необходимости анализа и идентификации базовых литых конструкций транспорта (автотракторного, железнодорожного), трубопроводов, нефтехимической промышленности, горно-обогатительного комплекса с разработкой многоуровневой структуры определения и прогнозирования эксплуатационных характеристик таких базовых литых конструкций, а также создания структуры и параметрических признаков по оптимизации эффективных технологических процессов, направленных на получение точных отливок малой металлоёмкости с прогнозируемыми потребительскими характеристиками.

Другим важным направлением литья из ВЧ является разработка новых технологических методов рационального модифицирования и легирования чугуна для получения требуемых размеров и формы графитовых включений, а также структуры металлической матрицы. При таком подходе удаётся за счёт использования методов рационального структурирования нивелировать роль графитовых включений, как концентраторов напряжений в чугуне. Исследования в этой области открывают широкие перспективы для получения изделий из рационально структурированных литых чугунов, которые могут достойно конкурировать с конструкционными сталями [1].

Недостатками широко применяемых модификаторов ЖКМК – легковесных сплавов – для ковшовой сфероидизирующей обработки чугуна является их склонность к всплыванию в открытом ковше со значительными газовыделениями и пироэффектом от горения магния. При этом происходит выгорание магния, и наблюдается склонность к шлакованию этих модификаторов при температуре чугуна ниже

1440 °С. Также имеет недостатки и автоклавный способ ковшового модифицирования чугуна – случаи неоднородности металла по степени сфероидизации графита, значительную продолжительность обработки и разлива чугуна небольшими ковшами, помещаемыми в автоклавы.

При разработке состава и технологии применения лигатуры было изучено влияние элементов (%): 0,2-1,5 Mn; 0,03-1,5 Cu; 0,02-0,05 Sn на микроструктуру (количество и форму включений графита, содержание перлита) и механические свойства ЧШГ химического состава (%): 3,4-3,7 C; 2,4-2,8 Si; 0,01-0,015 S; 0,025-0,1 P; 0,03-0,05 Mg; железо – остальное. Установлено, что марганец, медь и олово улучшают форму включений графита, медь – эффективнее, чем олово, способствует увеличению количества зародышей графита, что стимулирует графитизацию металла в жидком состоянии, тем самым понижая дефицит питания отливки и возможность образования усадочных дефектов. Содержание марганца выше 0,5 % уменьшает количество зародышей графита. Перлитную структуру ЧШГ обеспечивает содержание 1 % Cu или 0,08 % Sn, либо 0,4 % Mn и 0,6 % Cu [5], что весьма желательно для литья в ВФ, при котором отливки из ВЧ обычно имеют твердость на 10-15 НВ ниже, чем при ПГФ. Медь способствует улучшению механических свойств ЧШГ, при содержании 1,5 % Cu получен ЧШГ марки ВЧ700-2 в отливках без термообработки. Марганец и олово оказывают меньшее влияние на механические свойства ЧШГ, чем медь, т. к. добавка марганца приводит к укрупнению зерна перлита, а добавка олова – к его микроликвации по границам зерен [6].

Лигатуру изготавливали в литейном цехе её применения путём расплавления катодной меди М1к (ГОСТ 546-88) в индукционной печи с последующим перегревом до 1160-1200 °С. Затем в тигель добавляли кусковой металлический магний Mg95 (ГОСТ 804-93) – вводили через зеркало металла, присыпанное слоем древесного угля или графитовой стружки толщиной 20-30 мм. Количество магния рассчитывали из потребности содержания его в лигатуре при усвоении в расплаве меди 90-95 %. После усвоения магния лигатуру разливали в плоские чугунные изложницы.

Медно-магниевая лигатура состава 95 % Cu и 5 % Mg имеет температуру плавления до 900 °С, что позволяет ей легко растворяться в чугуне при модифицировании, не требуется её мелкого дробле-

ния [5, 6]. Наиболее простое по операциям применения и с меньшей трудоёмкостью, чем внутрiformенное, ковшовое модифицирование имеет преимущество – перед заливкой в форму можно взять пробу из ковша и экспресс-анализом определить химический состав чугуна и, в частности, критическое содержание модифицирующих элементов. Совершенствованием также способов термического экспресс-анализа чугуна активно занимается группа учёных ФТИМС НАН Украины под руководством Э. В. Захарченко.

Кроме того, изготавливали лигатуру следующего состава (%): 60 Cu; 5 Mg; 10 ФС30РЗМ30 (ТУ 14-5-138-81); 15 ферромарганца ФМn75 (ГОСТ 4755-91), 10 стальной обрезки. При выплавке этой лигатуры в шихту добавляли медь и сталь, после расплавления в металл – ферромарганец, модификатор с РЗМ, а перед разливкой – магний [6]. Эта комплексная лигатура экономит медь, за счёт добавок РЗМ повышает надёжность сфероидизации графита путём связывания элементов-демодемодификаторов, неконтролируемых по химическому составу, в шихте чугуна.

Модифицирование чугуна лигатурами в количестве 1,5-1,7 % производят в открытом ковше. Лигатуры имеют удельный вес, близкий к чугуну, в отличие от широко применяемых кремниевых составов типа ЖКМК. Это затрудняет их всплывание на поверхность чугуна при модифицировании. Усвоение магния составляет свыше 70 %. Для модифицирования не требуется высокий перегрев чугуна. Разливку в формы можно вести при температуре ниже 1300 °С, что применимо для толстостенных отливок без применения прибылей [2, 3], в частности, отливок гидрораспределителя из ВЧ500-2 (рис. 2). Процесс модифицирования сопровождается весьма незначительными выделениями газов, что существенно улучшает условия труда – предотвращает загазованность литейного цеха. В большинстве случаев ускоряется процесс модифицирования и разлива металла, повышается производительность плавильных участков, не требуется мелкого дробления модификаторов, их пригрузки в ковше, специальных закрытых ковшей. Лигатуры на основе меди внедрены на ряде машиностроительных предприятий СНГ, в том числе для получения отливок без прибылей в песчаных ВФ с использованием указанных способов.

На рис. 2 показаны примеры отливок из высокопрочного чугуна, полученные в ВФ: отливка

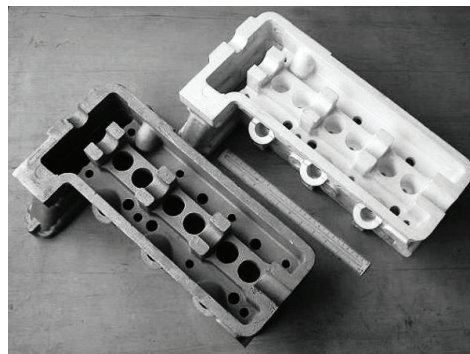
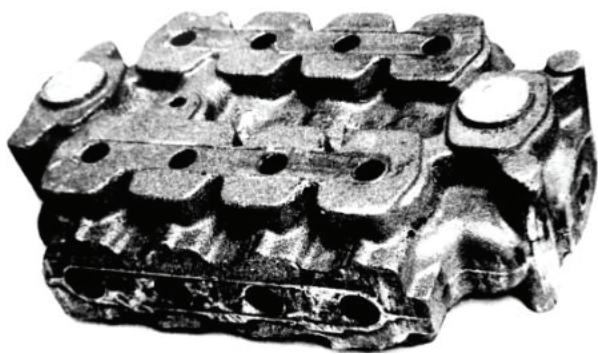
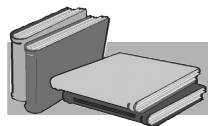


Рис. 2. Примеры отливок из высокопрочного чугуна, полученные в ВФ: отливка моноблочного гидрораспределителя из ВЧ500-2, а также модель и отливка головки блока цилиндров из ВЧ450-5

моноблочного гидрораспределителя из ВЧ500-2, а также модель и отливка головки блока цилиндров из ВЧ450-5.

Рассмотренные примеры литья ВЧ в ВФ и выплавки тяжеловесной лигатуры для ковшового модифицирования одновременно с перлитизацией структуры ВЧ относятся к малозатратным литейным техно-

логиям. Литьё в ВФ, в свою очередь, обеспечивает удаление газов из контактной зоны «металл-форма» сквозь песчаную среду формы и систему вакуумирования на последующую их очистку, что в совокупности описанным модифицированием с низкой газотворностью тяжеловесной лигатурой улучшает экологическую культуру литейного производства.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Макаренко К. В.* Рациональное структурирование графитизированных чугунов / К. В. Макаренко // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2014. – № 2. – С. 196-205.
2. А. с. 1694316 СССР: МКИ В22С 9/02. Способ изготовления отливок из чугуна с шаровидным графитом / В. С. Дорошенко, Н. И. Шейко. – Оpubл. 1991, Бюл. 44.
3. А.с. 1792791 СССР: МКИ В22С 9/02. Способ получения отливок без прибылей из чугуна с шаровидным графитом в вакуумно-пленочных формах / В. С. Дорошенко, Н. И. Шейко. – Оpubл. 1993, Бюл. № 5.
4. *Дорошенко В. С.* Литье металлополосы по газифицируемой пленке на вакуумируемом валке / В. С. Дорошенко // Металлургия машиностроения. – 2013. – № 6. – С. 24-28.
5. *Гербер В. С.* Сфероидизирующие лигатуры на основе меди в производстве высокопрочного чугуна / В. С. Гербер, В. С. Дорошенко, Б. С. Микита // Тяжёлое машиностроение. – 1992. – № 6. – С. 29-30.
6. *Гербер В. С.* Применение безавтоклавной технологии модифицирования чугуна с шаровидным графитом / В. С. Гербер, В. С. Дорошенко // Информационный сборник. – М.: ЦНИИСтроймаш, 1990. – Вып. 2 – С. 13-14.

Анотація

Дорошенко В. С., Шинський В. О.

Особливості лиття високоміцного чавуну в вакуумовані форми

Особливість лиття в вакуумовані піщані форми обумовлена впливом вакууму на метал вилівка, що сприяє прискореному утворенню її поверхневого шару з подрібненням структурних складових. Незначне зниження твердості вилівка з ВЧ в цілому запропоновано компенсувати застосуванням мідно-магнієвих лігатур, приклад виплавки яких в умовах ливарного цеху описаний у статті.

Ключові слова

вакуумована форма, високоміцний чавун, лігатура, модифікування, вакуум, точність вилівка, заощадження металу

Summary

Doroshenko V., Shinskiy V.

Special features of ductile iron casting into evacuated molds

The special features of casting into evacuated sand molds is determined by the vacuum influence on the casting metal, that helps to speed up the formation of the surface layer with a refinement of its structural components. There is provided in general to compensate the slight decrease of ductile iron casting hardness by using the copper-magnesium alloys. The example of master alloys smelting under the foundry conditions is described in the article.

Keywords

evacuated mold, ductile iron, alloys, modification, vacuum, precision casting, saving metal

Поступила 24.06.2015