

УДК 621.74

О.И. Пономаренко¹, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры литейного производства, e-mail: 21ponomarenko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3043-4497>

О.П. Косенко², специалист по разработке и внедрению технологических процессов, e-mail: olegkossenko@gmail.com

М.В. Швец¹, преподаватель-стажер, e-mail: shvecjr@gmail.com

С.Д. Евтушенко¹, студент

¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

²АО «Харьковский машиностроительный завод «Свет шахтера», Харьков, Украина

Применение компьютерно-интегрированного проектирования для нетехнологичных отливок шахтного оборудования

В данной статье показана возможность применения компьютерно-интегрированного проектирования для получения нетехнологичных отливок высокого качества для шахтного оборудования. Использование CAD/CAE программ открывает новые возможности для инженеров-технологов и конструкторов, значительно сокращается время на разработку технологических процессов и изготовление оснастки. Это позволяет сэкономить расходы сплава за счет прогнозирования появления мест дислокации дефектов, уменьшить брак отливок, а также дает возможность проверки детали на различные виды прочностных нагрузок на ее виртуальной модели.

Нетехнологическая отливка «Направляющая» была представлена в 3D системе с помощью программ SolidWorks и LVMFlow. Отливка имеет вид перевернутого табурета с четырьмя ножками. Это обусловило появление в отливке большого количества тонких и толстых стенок, которые чередуются. В местах переходов были установлены галтели. Для ликвидации во внутренних углах отливки скопления газоусадочной пористости было предложено увеличить толщину ножек. Отливка имеет большую высоту. Чтобы выдержать гидростатический напор заливаемого металла, было предложено использовать песчано-смоляную смесь.

Для ликвидации горячих трещин в отливке, при кристаллизации в местах сопряжения крышки с ножками было принято решение установить специальные стяжки между ножками. Такое технологическое решение устранило появление трещин в отливке. Установка экзотермических прибылей позволила увеличить эффективность работы литниково-питающей системы за счет экзотермической реакции при контакте расплава с элементом и газовым давлением в прибыли; снизить брак по дефектам усадочного характера; уменьшить металлоемкость прибыли (до 40 %) и технологические припуски на механическую обработку прибыльных мест с 15–20 мм до 4–5 мм; дало возможность установки прибылей на любой поверхности без нарушения конфигурации отливки.

Разработанный технологический процесс введен на одном из литейных предприятия Украины.

Ключевые слова: направляющая, формовочная смесь, литейная форма, модельный комплект, LVMFlow, SolidWorks, компьютерно-интегрированное проектирование, газоусадочная пористость, трещина.

Литейные изделия составляют значительную долю по массе и трудоемкости изготовления любого вида продукции машиностроения. От качества отливок, их точности и экономичности в итоге зависит и качество конечной продукции – двигателей, станков, автомобилей. Как показывает мировой опыт, совершенствование изделий машиностроения невозможно без существенного повышения сложности, качества, эксплуатационных свойств, точности и уменьшения толщины стенок литых заготовок. Сегодня в практике проектирования литых деталей, а также для решения задач по моделированию процессов кристаллизации применяется ряд специализирован-

ных программных пакетов трехмерного проектирования. Учитывая, что выбор исходных параметров для компьютерного моделирования осуществляется непосредственно конструктором или технологом на основе личного опыта, бывает проблематичным заранее с большой степенью вероятности определить правильность выбранных технических решений. Вопросы, связанные с формализацией процессов локализации внутренних дефектов литейного производства, должны обязательно решаться на этапе компьютерного моделирования процесса кристаллизации литой детали [1, 2]. Получение качественных отливок за счет использования новых методов и

программных продуктов, таких как *SolidWorks* и *LVMFlow* являются актуальной задачей литейного производства.

Целью исследования данной работы является применение компьютерно-интегрированного проектирования для получения нетехнологичных отливок высокого качества для шахтного оборудования, которое позволяет моделировать процесс заполнения формы расплавом и охлаждения отливки для обнаружения мест дислокации внутренних дефектов.

Подготовка производства изделия является наиболее важным этапом, во время которого определяется возможность его производства в условиях конкретного предприятия, здесь разрабатывается 3D-модель будущего изделия, производится моделирование, доводка технологии производства, выпускается технологическая документация изделия.

Одним из главных этапов изготовления изделия является способ изготовления отливки и оценка возможности изготовления на имеющемся оборудовании. Создание 3D-модели изделия происходит с помощью CAD пакетов разного уровня, которые бесконфликтно работают в среде PDM системы. В дальнейшем 3D-модель является основой для различных конструктивных расчетов с эксплуатационными нагрузками. Затем на ее основе создается 3D-модель отливки.

Далее проводится моделирование технологического процесса производства литой детали с помощью CAE систем. После анализа полученных результатов моделирования вносятся изменения в 3D-модели детали и отливки. Причем, при внесении некоторых поправок в 3D-модели детали, таких как дислоцированные литейные дефекты, производятся повторные конструктивные расчеты с эксплуатационными нагрузками, с последующим внесением поправок в конструкцию детали.

Из вышеперечисленного следует, что технологическое проектирование обеспечивает постоянное и полное взаимодействие технических подразделений, ответственных за выпуск технической документации для изделия. Такой подход к проектированию позволяет одновременно связывать такие параметры, как оптимальная конструкция детали, технологичность ее изготовления, а также закладывать эти параметры на этапе подготовки производства, сокращая при этом время на их проектирование.

Отливка «Направляющая» является стальной отливкой (рис. 1). Габариты 420x470x664 мм. Чистый вес заготовки составляет 361 кг. Изготавливается из

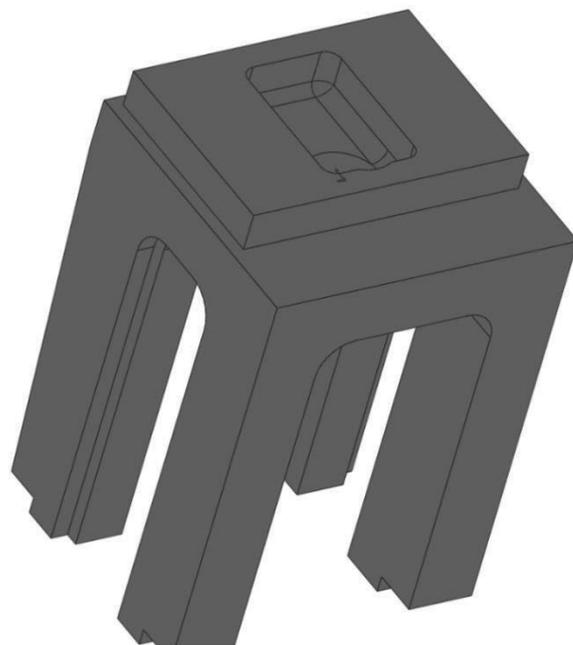


Рис. 1. Модель детали «Направляющая» с припусками

стали 35ХГСЛ ГОСТ 977-88.

Отливка «Направляющая» должна выполняться по следующим техническим условиям:

1. Отливка II группы ГОСТ 977-88.
2. Точность отливки 12-0-0-12 по ГОСТ 2009-75.
3. Формовочные наклоны по ГОСТ 3212-80, тип I, II.
4. Неуказанные литейные радиусы 10–15 мм.
5. Остатки дополнений, технологические стяжки, остатки литниковой системы удалить Rz80 мкм.

Отливка имеет большую высоту, что требует специальных составов формовочных и стержневых смесей, чтобы выдержать гидростатический напор заливаемого металла. Было предложено использовать песчано-смоляную смесь.

Формовочная смесь готовится в смесителе "AMDR8" фирмы "OMEGA". Состав смесей приведен в табл. 1.

- Газообразующая способность, см³/г – не более 10.
- Газопроницаемость смеси, ед. – не менее 200.
- Осыпаемость, % – не более 0,5.

С понижением температуры окружающей среды необходимо увеличивать содержание катализатора [3].

Отливка имеет вид перевернутого табурета с четырьмя ножками. Это обуславливает появление в отливке большого количества тонких и толстых стенок, которые чередуются. В местах переходов были установлены галтели.

Таблица 1

Состав смесей

Состав смеси	1 – программа	2 – программа	3 – программа
Песок формовочный, K016	100 %	–	5–10 %
Регенерат (восстановленный песок)	–	100 %	95–90 %
Смола "ASKURAN"-381 фирма Ashland	1,0–1,1 % более 100 %	0,9–0,7 % более 100 %	1,0–0,8 % более 100 %
Отвердитель (катализатор), HARTER RAPID 05	0,6–0,5 % более 100 %	0,5–0,4 % более 100 %	0,5–0,4 % более 100 %

Однако при первичном проливании во внутренних углах отливки наблюдалось скопление газоусадочной пористости. Чтобы исключить ее появление, было предложено увеличить толщину ножек.

Кроме того, во время кристаллизации в местах сопряжения крышки с ножками может возникнуть значительное напряжение, которое может привести к появлению горячих трещин в отливке. Чтобы этого не происходило, было принято решение установить специальные стяжки между ножками. Такое технологическое решение устранило появление трещин в отливке, однако вызвало потребность в усложнении конструкции стержневого ящика.

Проектирование начинается с выбора места разъема модели и формы (рис. 2), было решено ответственную часть отливки «Направляющая» расположить в нижней полуформе. При данном размещении отливки используется минимальное количество литейных стержней и проходит равномерно направленная кристаллизация, что обеспечивает снижение

брака через отсутствие усадочных раковин, пористости и недоливов [4].

Класс точности размеров и ряд припусков на механическую обработку был выбран по ГОСТ 2009-75. Класс точности – 12, ряд припусков – 3.

Для определения припусков на механическую обработку использовали ГОСТ 2009-75. Однако для плавного протекания кристаллизации и уменьшения внутренней усадки, припуски были увеличены в два раза, так как при компьютерном моделировании было обнаружено, что такое действие способствует качественному изготовлению отливки [5]. Результат компьютерного моделирования по расчету припуска на механическую обработку приведен на рис. 3.

Допуск габаритных размеров отливки – 8 мм по ГОСТ 2009-75.

Точность изготовления отливок во многом определяется точностью установки стержней в форму и их фиксацией при сборке. Точность установки стержня обеспечивается конфигурацией его знаков, их размерами, которые назначают по ГОСТ 3606-80 с учетом размеров стержня, способа формования и его положения в форме [5].

Размеры стержня: длина – 512 мм, ширина – 418 мм, высота – 670 мм. Высота стержневого знака – 50 мм. Формовочный уклон знака составляет 5 мм кругом. Зазор стержневого знака – 1 мм. Для изготовления стержней для отливки «Направляющая» применяют разъемный стержневой ящик.

Учитывая тип производства, все модельное оснащение для получения отливки «Направляющая» изготавливаем деревянным. Деревянные модельные комплекты, в отличие от металлических, более дешевые, простые в изготовлении и использовании, легкие. Модели отливки и прибыли выполнены полыми и снабжены ребрами жесткости, с целью придания им большей жесткости. При определении размеров деревянной модели учитываем суммарную

усадку сплава модели и сплава отливки. В данном случае усадка на модели равна 2%. Кроме того, модель, кроме учета усадки, изготавливается с припуском на механическую обработку, а также с уклонами и зазорами для знаков стержней, галтелями. Формовочный уклон на формообразующих поверхностях модельных комплектов составляет 1° 13' [6].

После заливки формы отливка охлаждается и затвердевает. Полностью затвердевая отливка должна некоторое время охлаждаться с формой, поскольку прочность металла при высоких температурах мала, и отливка может разрушаться при выбивании ее из формы. Кроме того, выбивка отливки при высокой температуре нежелательна, поскольку охлаждение ее на воздухе протекает неравномерно:

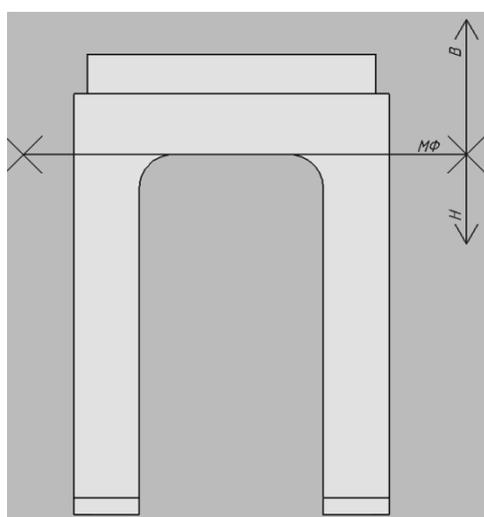


Рис. 2. Разъем отливки «Направляющая»

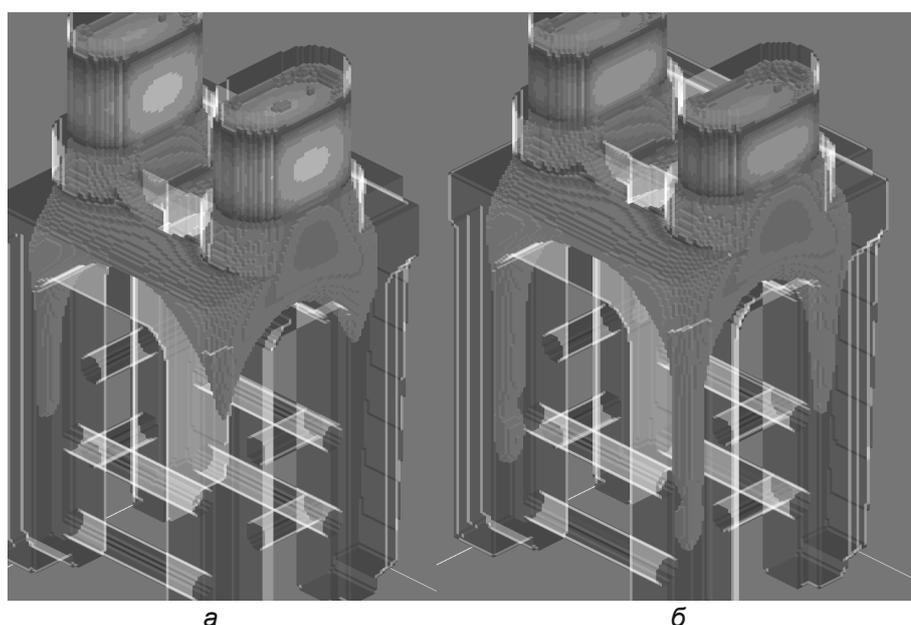


Рис. 3. Компьютерное моделирование припуска на механическую обработку: а – припуск увеличен в 2 раза; б – припуск по ГОСТ 2009-75

тонкие частицы охлаждаются значительно быстрее массивных, что вызывает появление в отливках внутреннего напряжения, искажения отливок и даже трещины [7].

Продолжительность охлаждения отливки в форме, согласно справочнику Могилева «Зависимость продолжительности охлаждения отливки из стали до выбивки из формы», составляет 7 часов [8].

Для снижения литейного напряжения, стабилизации размеров, снижения твердости, улучшения обрабатываемости, повышения механических свойств, износостойкости отливок, необходимо провести термическую обработку.

Нетехнологическая отливка «Направляющая» была представлена в 3D системе с помощью программ *SolidWorks* и *LVMFlow*.

Данная отливка моделировалась в программе *SolidWorks* методом твердотельного моделирования. В процессе работы рассмотрен метод вырезания конструктивных элементов из большого болвана, процесс создания 3D-модели отливки показан на рис. 4. Модель выполнена в 18 шагов.

Также для симуляции процесса кристаллизации были созданы модели экзотермических вставок (рис. 5). Технология изготовления отливки с использованием экзотермических вставок позволяет значительно уменьшить трудоемкость и себестоимость изготовления отливки, по сравнению с похожими отливками, которые изготавливались для шахтного оборудования.

После файлы моделей экзотермических вставок для проектируемой отливки были сохранены и добавлены в сборку к модели отливки (рис. 6).

После выполнения последних операций полученная сборка была сохранена в формате *STL*, поскольку симуляция кристаллизации выполнялась в программном пакете *LVMFlow*.

Было выбрано несколько типов экзотермических вставок, эффект получился разный.

Как видно на рис. 7 (а) – заданных экзотермических вставок *OBG7* не хватает для того, чтобы запитать всю отливку. В теле заготовки появляются усадочные раковины, что является не допустимым. В технологии с такими же экзотермическими вставками, но большей высоты *OBG7/300* усадка отсутствует (рис. 7, б). При использовании вставок *OBG7/300* отливка вышла высокого качества, на ней нет ни одного дефекта и технологию можно внедрять в производство.

С применением компьютерных методов моделирования отверждения отливки, был разработан технологический процесс изготовления отливки «Направляющая» из стали 35ХГСЛ. Благодаря этим методам удалось скорректировать полученную технологию и получить удовлетворительные результаты симуляции. В данной технологии мы можем наблюдать, что металл кристаллизуется постепенно без обрывов жидких фаз, которые влекут за собой дефекты усадочного характера, можно с уверенностью сказать, что отливка питается удовлетворительно, и при реальном изготовлении отливки не будет наблюдаться дефектов усадочного характера.

Выводы

1. Литейное производство является основной заготовительной базой машиностроения. Удельный вес литых деталей достигает: в современных автомобилях – 25 %, в асинхронных двигателях – 60 %, в тракторах – 58 %. К качеству отливок с каждым годом предъявляют все более высокие требования. При этом необходимо снижать трудоемкость их

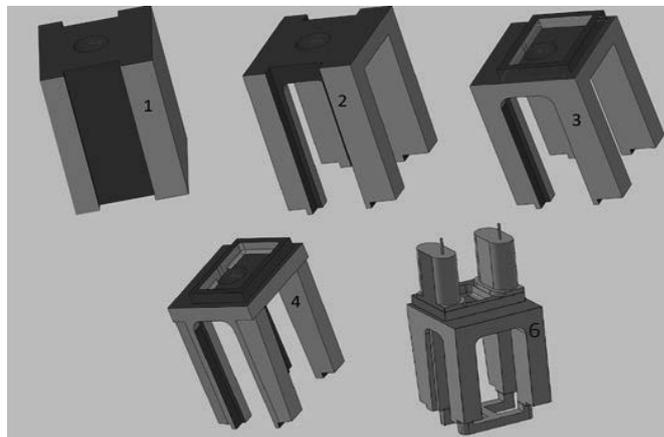


Рис. 4. Проектирование 3D-модели

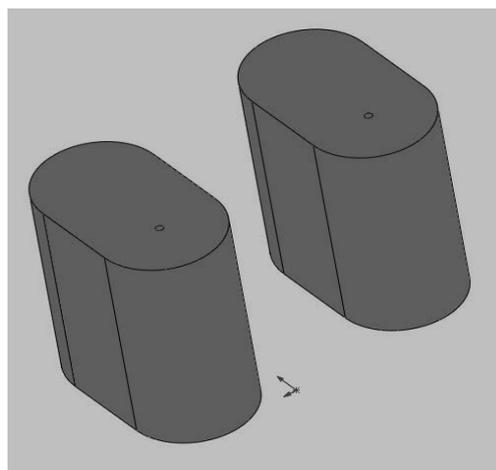


Рис. 5. 3D-модель экзотермических вставок для отливки

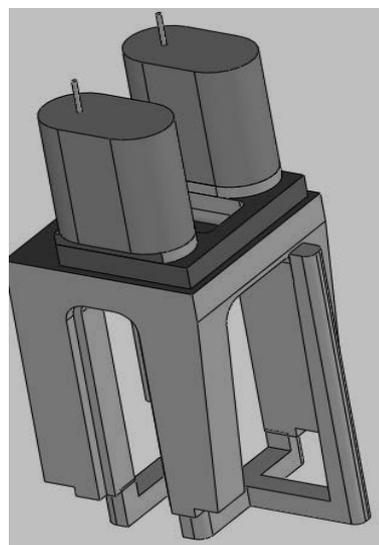


Рис. 6. Модель в сборе

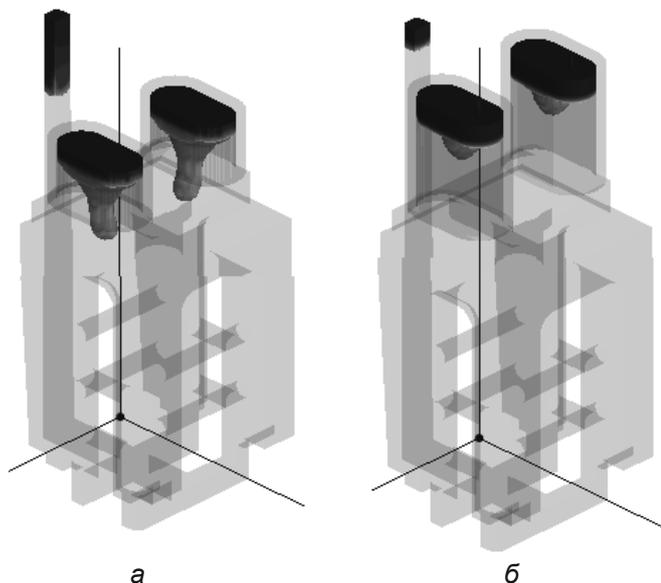


Рис. 7. Результаты проведенного расчета усадочных дефектов: а – OBG7; б – OBG7/300

изготовления, повышать производительность агрегатов и улучшать условия труда в литейных цехах.

2. Одним из возможных путей решения задачи повышения качества отливок является использование математических или компьютерно-интегрированных методов моделирования процессов, многочисленных методов расчета.

Использование CAD/CAE программ открывает новые возможности для инженеров-технологов и конструкторов, значительно сокращается время на разработку технологических процессов и изготовление оснастки. Это позволило сэкономить расходы сплава за счет прогнозирования появления мест дислокации дефектов, уменьшить брак отливок, а также дало возможность проверки детали на различные виды прочностных нагрузок на ее виртуальной модели.

3. Нетехнологическая отливка «Направляющая» была представлена в 3D системе с помощью про-

грамм *SolidWorks* и *LVMFlow*. Отливка имеет вид перевернутого табурета с четырьмя ножками. Это обусловило появление в отливке большого количества тонких и толстых стенок, которые чередуются. В местах переходов были установлены галтели. Для ликвидации во внутренних углах отливки скопления газоусадочной пористости было предложено увеличить толщину ножек.

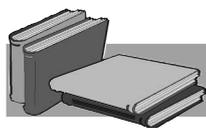
4. Отливка имеет большую высоту. Чтобы выдержать гидростатический напор заливаемого металла, было предложено использовать песчано-смоляную смесь.

5. Для ликвидации горячих трещин в отливке, при кристаллизации в местах сопряжения крышки с ножками было принято решение установить специальные стяжки между ножками. Такое технологическое решение устранило появление трещин в отливке.

6. Для технологии выбираем две экзотермические вставки моделей OBG7 или OBG7/300 (овальные открытого типа) фирмы «*Cukurova Kimya Industrisi*», предварительно определив в программе *LVMFlow*, которая из них не допустит образования усадки. Это позволило увеличить эффективность работы питательных прибылей за счет экзотермической реакции при контакте расплава с элементом и газовым давлением в прибыли; снизить брак по дефектам усадочного характера; уменьшить металлоемкость прибыли (до 40 %) и технологические припуски на механическую обработку прибыльных мест с 15–20 мм до 4–5 мм; дало возможность установки прибылей на любой поверхности без нарушения конфигурации отливки.

7. Разработанный технологический процесс введен на одном из литейных предприятий Украины.

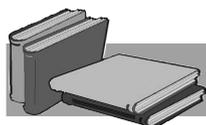
8. Данные проведенных исследований используются при преподавании курса лекций по дисциплине «CAD/CAE в литейном производстве».



ЛИТЕРАТУРА

1. Алехин В.И., Акимов О.В., Марченко П.А. Компьютерное моделирование процессов при производстве литых деталей двигателя. *Литейное производство*. 2010. № 9. С. 31–33.
2. Алехин В.И., Белогуб А.В., Марченко А.П., Акимов О.В. Компьютерно-интегрированное моделирование литейных процессов в автомобильных поршнях на основе конструкторско-технологической методики проектирования деталей ДВС. *Двигатели внутреннего сгорания*. 2009. № 2. С. 101–104.
3. Илларионов И.Е., Васин Ю.П. Формовочные материалы и смеси. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1992. 223 с.
4. Титов Н.Д., Степанов Ю.А. Технологии литейного производства. М.: Машиностроение, 1974. 472 с.
5. Кулаков Б.А. и др. Технология изготовления литейных форм: учеб. пособие к лабораторным и практическим занятиям. Челябинск: ЮУрГУ, 1998. 96 с.
6. Власов А.Ф., Васильев П.В. Справочник конструктора модельной оснастки. М.: Машиностроение, 1980. 125 с.
7. Василевский П.Ф. Технология стального литья. М.: Машиностроение, 1974. 408 с.
8. Могилев В.К., Лев О.И. Справочник литейщика. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.

Поступила 09.06.2019



REFERENCES

1. Alekhin, V.I., Akimov, O.V., Marchenko, A.P. (2010). Computer modeling of processes in the production of cast engine parts. *Liteinoe proizvodstvo*, no. 9, pp. 31–33 [in Russian].
2. Alekhin, V.I., Belogub, A.V., Marchenko, A.P., Akimov, O.V. (2009). Computer-integrated modeling of casting processes in automobile pistons based on design and technological methods for designing engine parts. *Engines of internal combustion*, no. 2, pp. 101–104 [in Russian].
3. Illarionov, I.E., Vasin, Yu.P. (1992). Molding materials and mixtures. Cheboksary: Publishing house Chuvash. University, 223 p. [in Russian].
4. Titov, N.D., Stepanov, Yu.A. (1974). Foundry technology. Moscow: Mashinostroenie, 472 p. [in Russian].
5. Kulakov, B.A. et al. (1988). Technology of production of casting molds: manual for laboratory and practical classes. Chelyabinsk: SUSU, 96 p. [in Russian].
6. Vlasov, A.F., Vasil'ev, P.A. (1980). Designer's reference book of the modern equipment. Moscow: Mashinostroenie, 125 p. [in Russian].
7. Vasilevsky, P.F. (1974). Steel casting technology. Moscow: Mashinostroenie, 408 p. [in Russian].
8. Mogilev, V.K., Lev, O.I. (1988). Caster handbook. Moscow: Mashinostroenie, 272 p. [in Russian].

Received 09.06.2019

Анотація

О.І. Пономаренко¹, д-р техн. наук, проф., проф. кафедри ливарного виробництва, e-mail: 21ponomarenko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3043-4497>; **О.П. Косенко**², фахівець з розробки та впровадження технологічних процесів, e-mail: olegkossenko@gmail.com; **М.В. Швець**¹, викладач-стажист, e-mail: shvecjr@gmail.com; **С.Д. Євтушенко**¹, студент

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

²АТ «Харківський машинобудівний завод «Світло шахтаря», Харків, Україна

Застосування комп'ютерно-інтегрованого проєктування для нетехнологічних виливків шахтного обладнання

У даній роботі показано можливість застосування комп'ютерно-інтегрованого проєктування для отримання нетехнологічних виливків високої якості для шахтного устаткування. Використання CAD/CAE програм відкриває нові можливості для інженерів-технологів і конструкторів, значно скорочується час на розробку технологічних процесів і виготовлення оснастки. Це дозволяє заощадити витрати сплаву за рахунок прогнозування появи місць дислокації дефектів, зменшити брак виливків, а також дає можливість перевірки деталі на різні види навантажень на міцність на її віртуальній моделі.

Нетехнологічний виливок «Направляючий» було представлено в 3D системі за допомогою програм SolidWorks і LVM-Flow. Виливок має вигляд перевернутого табурета з чотирма ніжками. Це зумовило появу у виливку великої кількості тонких і товстих стінок, які чергуються. У місцях переходів було встановлено галтелі. Для ліквідації у внутрішніх кутах виливка скупчення газоусадкової пористості було запропоновано збільшити товщину ніжок. Виливок має велику висоту. Щоб витримати гідростатичний напір металу, що заливається, було запропоновано використовувати піщано-смоляну суміш.

Для ліквідації гарячих тріщин у виливку, при кристалізації в місцях сполучення кришки з ніжками було прийнято рішення встановити спеціальні стяжки між ніжками. Таке технологічне рішення усунуло появу тріщин у виливку. Установка екзотермічних прибутків дозволила збільшити ефективність роботи литниково-живильної системи за рахунок екзотермічної реакції при контактній розплаву з елементом і газовим тиском в прибутку; знизити брак стосовно дефектів усадкового характеру; зменшити металоємність прибутку (до 40 %) і технологічні припуски на механічну обробку прибуткових місць з 15–20 мм до 4–5 мм; дало можливість установки прибутків на будь-якій поверхні без порушення конфігурації виливку.

Розроблений технологічний процес запроваджено на одному з ливарних підприємств України.

Ключові слова

Направляючий, формувальна суміш, ливарна форма, модельний комплект, LVMFlow, SolidWorks, комп'ютерно-інтегроване проєктування, газоусадкова пористість, тріщина.

Summary

O.I. Ponomarenko¹, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Professor at the Foundry Department, e-mail: 21ponomarenko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3043-4497>; **O.P. Kosenko**², Specialist in the development and implementation of technological processes, e-mail: olegkossenko@gmail.com; **M.V. Shvets**¹, trainee teacher, e-mail: shvecjr@gmail.com; **S.D. Yevtushenko**¹, student

¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

² Public Joint-Stock Company "Kharkiv Machine Building Plant "Svet shakhtyora", Kharkiv, Ukraine

Application of computer-integrated design for non-technological castings of mine equipment

This article shows the possibility of using computer-integrated design to obtain high-quality non-technological castings for mining equipment. The use of CAD/CAE programs opens up new opportunities for process engineers and designers, significantly reduces the time to develop technological processes and manufacture of equipment. This saves the cost of the alloy by predicting the appearance of places of dislocation of defects, reduces the waste of castings, and also makes it possible to check the parts for various types of strength loads on its virtual model.

The non-technological casting "Guide" was presented in a 3D system using SolidWorks and LVMFlow programs. The casting has the form of an inverted stool with four legs. This led to the appearance in the casting of a large number of thin and thick walls that alternate. In places of transitions fillets were installed. To eliminate the accumulation of gas shrinkage porosity in the internal corners of the casting, it was proposed to increase the thickness of the legs. The casting has a great height. To withstand the hydrostatic pressure of the poured metal, it was proposed to use a sand-resin mixture.

In order to eliminate hot cracks in the casting, during crystallization in places where the lid with the legs mated, it was decided to install special ties between the legs. This technological solution eliminated the appearance of cracks in the casting. The installation of exothermic profits allowed to increase the operating efficiency of the gating system due to the exothermic reaction when the melt contacts the element and the gas pressure in the head; reduce defects on shrinkage defects; reduce the metal consumption of heads (up to 40 %) and technological allowances for the machining of head places from 15–20 mm to 4–5 mm; made it possible to install heads on any surface without disturbing the casting configuration.

The developed technological process was introduced at one of the foundries in Ukraine.

Keywords

Guide, forming mixture, casting form, model kit, LVMFlow, SolidWorks, computer-integrated design, gas-cutting porosity, crack.