

И.А.Мельников, Е.Н.Буданов

Отливки по вакуумно-пленочной формовке, изготовленные на заводе ME Elecmetal (США), для космической и других отраслей промышленности

Компания ME Elecmetal была основана в 2001 г. путем слияния двух предприятий – компании ME Global с фирмой Compania Electro Metallurgica S.A. (Elecmetal). Компания ME Global была основана в 1917 г. и на сегодняшний момент является одним из лидеров по производству точных высококачественных отливок из ударо- и износостойкого чугуна и стали, марганцовистой стали, а также среднеуглеродистой и низколегированной стали. Компания ME Global производит элементы дробилок, гусеничных траков экскаваторных ковшей, бурильного оборудования, шламовых насосов и других, а также литье на заказ (рис. 1–4).

ME Elecmetal является мировым лидером по поставкам металлической брони для мельниц, шаровых и стержневых дробилок. ME Elecmetal имеет три подразделения с офисом в Миннеаполисе, штат Миннесота, США. Отливки получают из следующих износостойких сплавов: самозакаливающаяся сталь (280–578 BHN), сталь (329–578 BHN) – закалка в воде и отпуск,

марганцовистая сталь (170–240 BHN), хромомолибденовый белый чугун (601–700 BHN).

Завод в г.Дулусе, штат Миннесота. Литейный завод выпускает детали и отливки из легированной стали и белого чугуна массой до 7 т по вакуум-процессу. Преимущества вакуумно-пленочной формовки концерна Sinto, накопленный опыт и применение запатентованных технологий позволяют производить наиболее крупные в мире (среди предприятий, использующих V-процесс) износостойкие отливки. Завод имеет сертификат соответствия ISO 9002.

Применяемое оборудование: 2 дуговые электрические печи по 11 т, вакуумная формовочная линия концерна Sinto с 6-позиционным формовочным центром, базовый размер опок 1370 x 2440 мм; вакуумный спектрометр и углеродный анализатор Leco; комплексные устройства термообработки для отжига, нормализации, отпуска и жидкой закалки (в масле или воде).

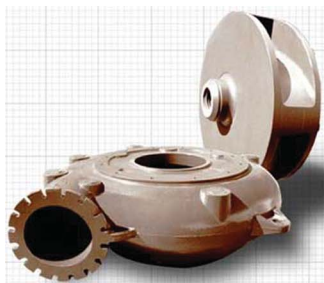


Рис. 1. Детали шламового насоса, отлитые на ME Electmetal

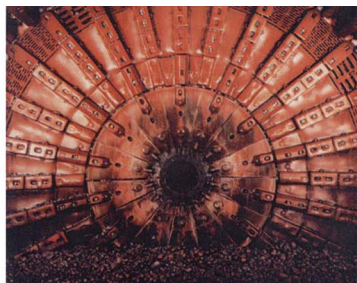


Рис.2. Вид изнутри дробилки диаметром 8,5 м

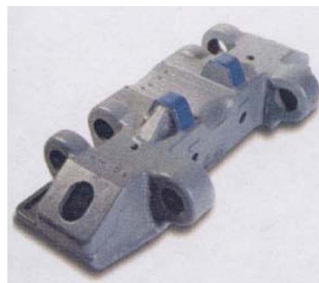


Рис.3. Звено гусеницы



Рис. 4. Детали конусных дробилок

Производительность вакуумно-пленочной формовочной линии 25400 т отливок в год, массой от 135 до 7250 кг, сериями от 1 шт. до 100 и более.

Именно на этом заводе на линии вакуумно-пленочной формовки была произведена стальная отливка трака гусеничного транспортера космического ракетносителя «НАСА», признанная лучшей отливкой 2005 г. по общему решению ассоциации литейщиков США (рис.5).

Трак гусеничного транспортера «Шаттл». Гусеничный транспортер – это огромное сверхмощное транспортное средство на гусеницах, используемое в центре космических полетов им. Кеннеди для транспортировки космического корабля «Шаттл» от ангара сборки до стартовой площадки (рис.6).

Каждый гусеничный транспортер приводится в движение четырьмя приводными агрегатами – тягачами, по одному с каждого угла транспортера (рис.7). Тягач напоминает обычный бульдозер и имеет две гусеницы, состоящие каждая из 57 траков, сцепленных вместе. При этом длина каждой гусеницы составляет более 36 м. Имея 8 гусениц для четырех приводных

устройств, общее число траков на одном транспортере составляет 456 шт.

Длина каждого трака 2300 мм, 630 мм – ширина, а вес около 950 кг (рис.8). Все гусеничные элементы выполнены из стали для большей прочности и долговечности. Центральная секция каждого трака имеет полую структуру коробчатого сечения для уменьшения веса без потери прочности и устойчивости.

Верхняя часть каждого трака (башмак) имеет два центральных гребня, которые служат направляющими для роликов приводных устройств. Обе стороны трака имеют несколько пальцев сцепки для соединения с соседними траками, в итоге образуя целую гусеницу. Центральные гребни и пальцы сцепки являются частью конструкции трака и именно на них приходится критическая нагрузка, поэтому к этим элементам предъявляются особенно высокие требования по прочности и долговечности. Внешние крылья имеют конусообразную форму. Максимальная толщина стенки отливки составляет 16,5 см, а самая тонкая секция – 2,54 см.

Впервые траки для обоих транспортеров (более 1000 шт.) были выпущены в 1965 г. по заказу космического агентства НАСА для ракетносителей Аполлон. Траки были изготовлены еще до изобретения вакуумно-пленочной формовки. Первые неисправности были установлены в 1986 г., когда вдоль роликового погона одного из траков были обнаружены длинные трещины. В 1990 г. во время транспортировки «Шаттла» к стартовой площадке внезапно вышли из строя два трака, треснув от роликового погона до пальцев сцепки. Места крепления переломились и старая гусеница распалась. Проведенные в 2003 г. проверки и тесты выявили различные трещины почти на 100 траках. Таким образом, необходимость замены гусениц была налицо.

Во время последующих испытаний в марте 2004 г. первый гусеничный транспортер с установленной измерительной аппаратурой проделал путь в 2,5 км для определения характеристик прочности. Эта проверка показала, что еще 10 траков треснули и подлежали замене. Детальный ана-

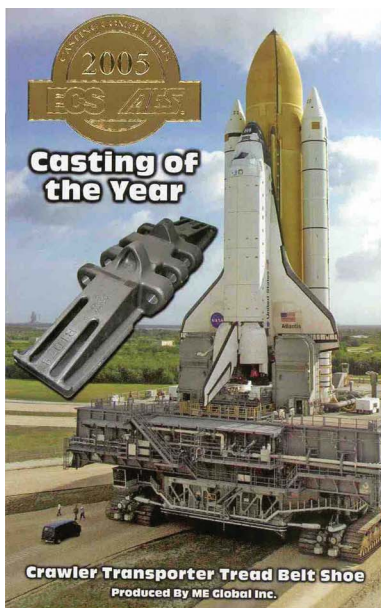


Рис.5. Ассоциация Литейщиков США признала лучшей отливкой 2005 г. трак транспортера ракетносителя, полученный методом вакуумно-пленочной формовки



Рис.6. Транспортировка космического корабля «Шаттл» от ангара сборки до стартовой площадки



Рис.7. Один из 4-х тягачей транспортера платформы ракетносителей НАСА

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48

лиз дефектов в лаборатории НАСА/ЦУП показал, что причиной поломки траков явилось усталостное изменение свойств материала. Такое разрушение было вызвано внутренними литейными дефектами, которые затем через сегрегированную неоднородную микроструктуру распространились и на наружную поверхность.

На основании экспертизы эксплуатационных показателей и анализа неисправностей, проведенных в 2004 г., инженеры НАСА пришли к выводу о необходимости выпуска новых гусениц для транспортера.

Требования к тракам гусеничного транспортера. Специалисты НАСА задали следующие эксплуатационные параметры и технологические требования:

- предел прочности на разрыв – 8963,5 кгс/см²;
- нижний предел текучести – 7584,5 кгс/см².

Требования к твердости были определены для 21 критической точки на отливке и разделены на 3 зоны ответственности:

- твердость по Бринеллю (ВНН) для центральных гребней и роликового погона составляла от 294 до 327 ВНН;
- твердость зоны пальцев сцепки составляла от 286 до 344 ВНН.

Чтобы добиться требуемой твердости в разных секторах отливки строение микроструктуры отливки должно четко контролироваться, что требует точного регулирования процесса термообработки (нагрев-закалка-отпуск).

Требования к обеспечению качества касались как параметров процесса заливки, так и общей проверки, тестирования, а также разрушающего и неразрушающего контроля отливок. Главные показатели проектирования – требования к исполнению, производству отливок и затратам тесно взаимосвязаны. Поэтому перед инженерами и проектантами стояли три основные задачи:

- выбор стального сплава, отвечающего всем механическим требованиям и обеспечивающего высокое качество отливок такого большого размера;
- выбор метода формовки, обеспечивающего необходимое качество поверхности и размерные допуски;

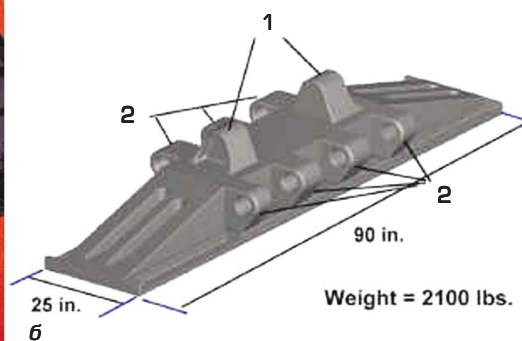


Рис. 8, а, б. Отливка «Трак гусеницы» транспортера: 1 – центральные гребни; 2 – пальцы сцепки

- разработка конструкции отливки и формы, для получения отливки без трещин и без лишних затрат.

Выбор сплава. В начале исследований был выбран сплав AISI 8640 (высокопрочный, высокопрокаленный стальной сплав с закалкой в масле, состав сплава, %: 0,38–0,43 С, 0,75–1,00 Мн, 0,15–0,30 Si, 0,40–0,60 Cr, 0,40–0,70 Ni, 0,15–0,25 Mo), чьи прочностные свойства посчитали достаточными для длительного срока службы. Но сложное поперечное сечение трака требовало быстрой закалки в воде для обеспечения необходимой прочности и твердости сплава, однако во время закалки в воде первый опытный образец сильно треснул в местах, не поддававшихся ремонту.

Необходимо было найти альтернативный сплав, который давал необходимую прочность, твердость, микроструктуру при оптимальной термообработке, и в то же время проходил бы закалку в воде не трескаясь в поперечнике.

Исследовали два Cr–Ni–Mo-стальных сплава: AISI 8630 (0,27–0,33С, 0,60–0,95 Мн, 0,15–0,30 Si, 0,35–0,65Cr, 0,35–0,75 Ni, 0,15–0,25 Mo) и AISI 4320 (0,17–0,23С, 0,40–0,70 Мн, 0,15–0,30 Si, 0,35–0,65Cr, 1,55–2,00 Ni, 0,20–0,30 Mo). Испытания этих двух сплавов показали, что их прочностные свойства не соответствовали требованиям, хотя и были близки к ним, и могли быть модифицированы добавлением лигатуры для повышения прочности и твердости, достаточных для крупного литья. Параметры термообработки отливок, а также механических испытаний приведены в таблице.

Параметры термообработки и механических испытаний отливок

Показатели	Базовые требования	AISI 8630 модифицированный	AISI 4320 модифицированный
Минимальный предел прочности на разрыв	8963,5 кгс/см ²	<8963,5 кгс/см ²	>8963,5 кгс/см ²
Минимальный предел текучести	7584,5 кгс/см ²	<7584,5 кгс/см ²	>7584,5 кгс/см ²
Приемлемая твердость	280–320 НВ	240–320 НВ	280–320 НВ
Закалка в воде	Без трещин	Да	Да

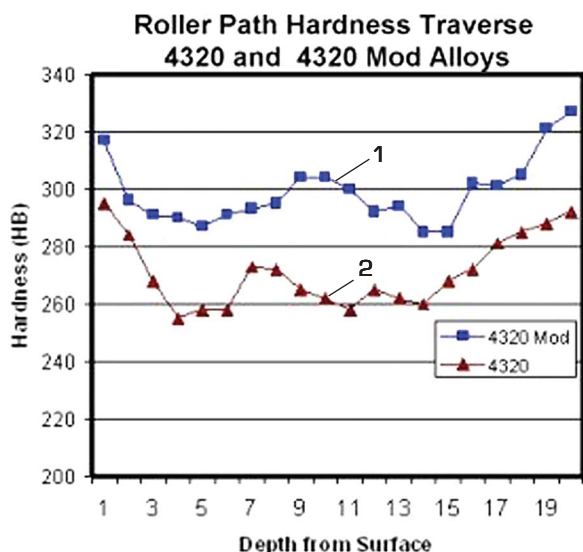


Рис.9. Твердость по Бринеллю опытного экземпляра трака: 1 – модифицированный сплав; 2 – немодифицированный сплав

Был выбран модифицированный стальной сплав AISI 4320. Когда из термообработанного стандартного сплава AISI 4320 была изготовлена пробная отливка, она прошла закалку в воде без появления трещин, но полученное изделие не имело достаточной прочности и твердости в более толстых секциях отливки. Тогда состав сплава был модифицирован добавлением легирующих присадок для увеличения твердости.

Из рис. 9 видно, что модифицированный сплав 4320 соответствует необходимым требованиям по твердости (280–320 HB). После термообработки, закалки и отпуска тестовая отливка из модифицированного AISI 4320 не треснула, показав полное соответствие требованиям по твердости и прочности во всех секциях отливки. Модифицированный сплав 4320 имел мартенситно-бейнитную микроструктуру во всех критических секциях и имел необходимые параметры прочности на разрыв, предел текучести и твердости.

Производство форм по V-процессу. На заводе ME Electmetal используется вакуумно-пленочная формовка (V-процесс) для производства песчаных форм с высокой размерной точностью, превосходным каче-

ством поверхности, нулевым модельным уклоном и неограниченным сроком службы модельной оснастки.

Основные параметры процесса.

V-процесс использует вакуум, который уплотняет сухой сыпучий песок без связующего вокруг модели в герметично закрытой опоке, к которой подведен вакуум от насосов.

Процесс использует специальную высокопластичную прочную полимерную пленку, чтобы «запечатать» открытые лад и контрлад песчаной формы, образуя полости нужной конфигурации. Вакуум внутри формы обеспечивает давление, которое удерживает песок по контурам модели даже после того, как сама модель удалена.

V-процесс может использоваться для литья практически всех металлов для производства всех размеров и форм отливок.

Вакуумно-пленочная формовка включает несколько последовательных этапов (на примере изготовления отливки трака:

1. Модель с системой вент-каналов устанавливается на подмодельную плиту, к которой подведен вакуум (рис. 10, а).
2. Нагретая полимерная пленка накладывается на модель, и вакуум тянет пленку вниз, заставляя ее плотно облепать все контуры модели. Затем на пленку наносится слой противопригарной краски (рис. 10, б).
3. Опока с вакуум-проводом ставится на покрытую пленкой модель и наполняется мелким сухим песком без связующего. Далее посредством вибрации песок равномерно распределяется в опоке (рис. 10, в).
4. Песок выравнивается и формируется литниковая воронка. Пластичная пленка накладывается на контрлад опоки, герметично закрывая форму. К опоке подключается вакуум, уплотняя песок в форме (рис. 10, г).
5. От модельной плиты отключается вакуум и опока под вакуумом снимается с модели (рис. 10, д).
6. Верхняя и нижняя полуформы, собираются и образуют единую, покрытую пластичной пленкой полость формы. Вакуум поддерживается в опоке во время заливки расплавленного металла (рис. 10, е).

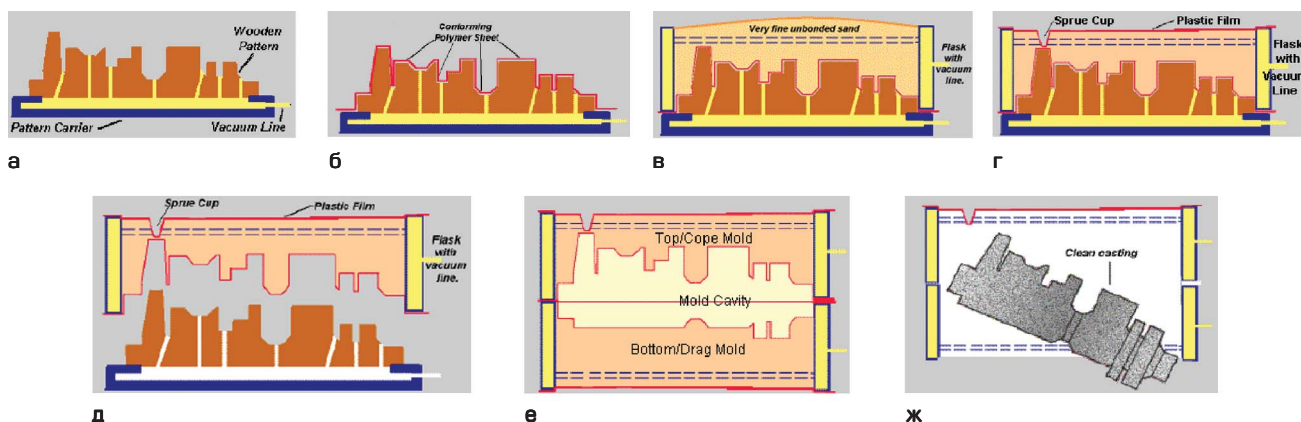


Рис.10, а-ж. Последовательность вакуумно-пленочной формовки

7. После заливки и охлаждения металла от опоки отключается вакуум. Песок без связующего свободно высыпается, оставляя чистую отливку с нулевым уклоном и шероховатостью поверхности 125–150 RMS (рис. 10, ж).

Контроль затвердевания отливок. Анализ дефектов ранее изготовленных отливок трака показал, что при затвердевании в теле отливки трака во внутренних секциях имела место усадка и пористость. Моделирование затвердевания на ME Electmetal подтвердило потенциальную усадку в этой зоне отливки. После того, как был произведен и протестирован первый новый опытный образец, аналогичный предыдущему по конструкции, проверка показала, что прототип имел ту же самую проблему – усадку в центре конструкции (рис. 11).

Моделирование затвердевания. Выполнили моделирование затвердевания для расчета температуры, фазового соотношения, пористости и микроструктуры в различных секциях отливки. Моделирование затвердевания – это важный процесс в проектировании самой геометрии для производства качественных отливок без дефектов. Инженеры фирмы ME Electmetal изменили конструкцию отливки, придав ее центральным секциям конусный вид для лучшего распределения расплавленного металла и затвердевания отливки трака. Моделирование позволило определить, что изменение геометрии отливки позволит устранить усадочные раковины, полости, трещины. Когда был отлит первый новый образец послойный анализ показал, что центральная секция отливки была однородно затвердевшей без следов пористости.

Характеристики полученной отливки заданной формы. Одним из преимуществ отливки было то, что вакуум-процесс производства позволил получать параметры конфигурации отливки, близкие к заданным. Появилась возможность снизить или вообще полностью отказаться от процесса механической обработки. Каждый палец сцепки на отливке имел отверстие $\varnothing 84$ мм для сцепки траков. Размер и расположение отверстий четко регламентировались и имели точные допуски. В ходе производства эти отверстия были получены прямо в пальцах сцепки простановкой песчаных стержней в форму. Отверстия, образованные стержнями, доводятся до нужных размеров путем двухступенчатой обработки сверлильной головкой (рис. 12). Использование стержней в процессе заливки исключило дорогостоящую операцию полного расквашивания всех семи отверстий для каждого трака.

Установка элементов формы.

Правильная установка элементов в форме для заливки явилась важной предпосылкой для производства качественных отливок (рис. 13). В данном случае пальца сцепки и центральные гребни являлись критическими зонами в конструкции трака, так как имели наиболее строгие механические требования и подвергались



Рис. 11. Контроль затвердевания отливок



Рис. 12. Отверстия для сцепки траков

наибольшим нагрузкам, поэтому вопрос установки модели в форму был особенно актуален. При возникновении литейных дефектов (пористость, различные включения), они, как правило, имеют тенденцию скапливаться в верхней половине отливки. Поэтому отливка должна была располагаться таким образом, чтобы механически обрабатываемая поверхность и критические секции находились именно в нижней полуформе. Модель трака была помещена ребордой в нижнюю опоку так, что его плоская поверхность располагалась в верхней части формы. Такое размещение наиболее критических участков внизу было наиболее удачно из-за отсутствия включений и пористости.

Стержни. При создании трака использовали 19 стержней – 2 больших стержня для образования полостей в центральной части отливки и 17 меньших по размеру стержней для формирования пальцев сцепки и отверстий в них, а также образования деталей поверхности трака (рис. 14). Всего на производство стержней только для одного трака было израсходовано более 300 кг песка.

Конструкция модели. Модели были выполнены из дерева, так как при использовании V-процесса отсутствует износ модельной оснастки (рис. 15). На верхней части модели были установлены 10 элементов литниковой системы, которые служили прибылями, питающими труднодоступные секции отливки жидким металлом во время затвердевания отливки в форме. Каждый трак изготавливали в отдельной форме, при этом обе

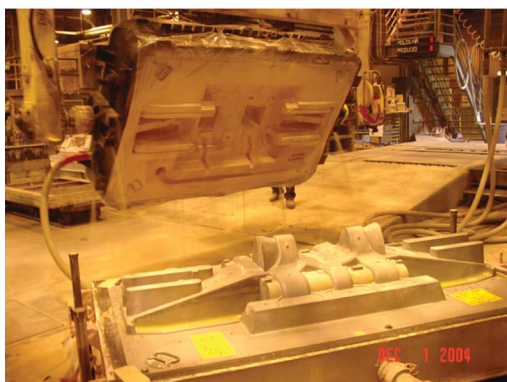


Рис. 13. Съем готовой полуформы с модельной плиты

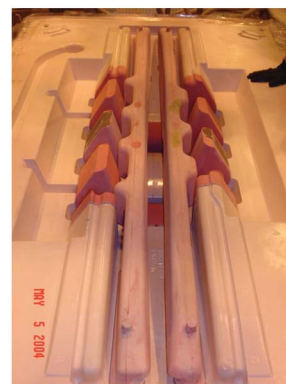


Рис. 14. Простановка стержней в полуформу низа. Наиболее критические элементы отливки находятся в нижней полуформе



Рис.15. Модельные плиты для верхней и нижней полуформ



Рис.16. Проверка отливки на плоскостность



Рис.17. Магнитопорошковая дефектоскопия

полуформы размещались в опоках размером 1370 x 2440 мм.

Процесс заливки и обработки включал четыре стадии:

- расплавленная сталь (температура 1565 °С) заливается в собранную песчаную форму и оставляется в опоке на 40 часов для охлаждения;
- после охлаждения отливка удаляется из формы и освобождается от формовочного песка;
- отливка проходит дробеструйную обработку;
- литники отбиваются, и линии заусенца вместе с остатками литников шлифуются начисто.

Термообработка. Термообработка трака явилась финальным шагом в обеспечении необходимых параметров прочности, твердости и микроструктуры отливки трака. Каждая отливка была подвергнута термообработке по режиму: нагрев до высокой температуры, закалка в воде и отпуск.

Механическая обработка. Финальную механообработку отверстий для сцепки выполняли на горизонтально-расточном станке на заводе Реммеле Инжиниринг. Были соблюдены все допуски на диаметр отверстий, их положение, шаг и обработку поверхности.

Контроль качества. К отливке были предъявлены строгие требования по контролю качества трака гусеницы. Контроль распространялся как на управление технологическим процессом и его документирование, так и на анализ и тестирование готовых отливок (рис. 16, 17). Первый этап определял процессы производства формы и стержней, плавку и заливку, тепловую, финишную и механическую обработку отливок.

Испытания отливок включали:

- определение твердости в 21 точке на каждой отливке;

- анализ обработки внешней и внутренней поверхностей и магнитопорошковая дефектоскопия каждой отливки;
- анализ каждой отливки на соответствие требованиям по высоте и плоскостности поверхности;
- контроль размера и положения обработанных деталей сцепки;
- произвольно выбирался один из каждого десятка траков для ультразвукового и радиографического исследования;
- один из каждых 32 траков был подвергнут полному размерному контролю;
- один из каждых 57 траков был подвергнут разрушающему анализу для проверки внутренних размеров, прочности, однородности микроструктуры, твердости и механической прочности.

За 6 месяцев специалисты ME Electmetal с успехом разработали, смоделировали, изготовили и поставили свыше 1000 однотонных стальных отливок траков гусеничного

транспортера (рис.18).

Преимущества производства траков гусеничного транспортера из стали по Вакуум-процессу:

- быстрое, экономически выгодное производство;
- конструкторская гибкость, быстрый период освоения производства;
- близость формы отливок к окончательной;
- мощный производственный потенциал.

Преимущества технологии изготовления форм по Вакуум-процессу, реализованной на ME Electmetal и других более чем 250 заводах:

- заполняемость формы металлом при заливке выше на 30%, чем при сырой формовке (доказано на пробах на жидкотекучесть);
- форма обеспечивает минимальную температуру заливки металла за счет высокой заполняемости;
- низкая себестоимость отливок;
- превосходное качество поверхности отливок без доводок (можно достичь шероховатости RZ-100 для отливок из стали, а для многих других чугунов отливок достигается RZ-70 и даже чище);
- нет традиционной системы смесеприготовления, достаточно транспортных операций с сухим песком (при необходимости только обеспыливание и охлаждение песка);
- нет системы регенерации смеси и отходов, высокая экологичность производства;
- обеспечиваются особо точные геометрические размеры, плоскостность и ребра отливок; минимальные допуски на механообработку отливок;
- возможность изготовления тонкостенных стальных отливок;
- точное воспроизведение форм и маркировок;

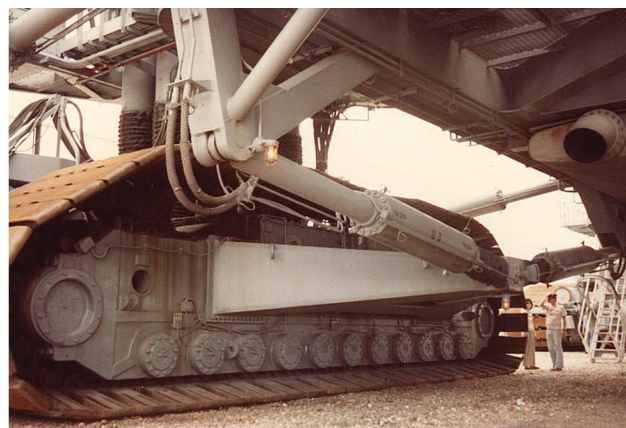


Рис. 18. Действующая конструкция гусеничной подвески транспортера космических кораблей США

- возможность обеспечения формовочного уклона до 0 градусов или отрицательных уклонов с помощью съемных частей модели;
- большой срок службы моделей, низкий износ моделей, так как нет контакта модели, изготовленной обычно из пластмассы или дерева, с песком (только с пленкой);
- минимальный расход заливаемых материалов, меньше прибыли и т.д.;
- существенное уменьшение условий для «горячих трещин»;
- есть возможность выбивки отливок при высоких температурах благодаря отсутствию даже вибрации при выемке отливок из формы;
- меньше затрат на термообработку;
- нет необходимости в специальном обучении персонала.

Заводы в странах СНГ, где в последние 3–4 года запущены, поставлены и проектируются к изготовлению линии вакуумно-пленочной формовки:

- ОАО «Кировский завод», Киров, Россия (2003 г.). Производство чугунных ванн. Размер опок 2000 x 1250 x 750/200 мм.
- ООО «Промтрактор-Промлит», Чебоксары, Россия (2004 г.). 2 линии. Производство стального ж/д литья «рама» и «балка». Размер опок 3000 x 1800 x 500/500 мм, 3000 x 1800 x 500/500 мм
- ОАО «Завод Универсал», Новокузнецк, Россия (2003–2004 гг.). Производство чугунных ванн. Размер опок 2000 x 1250 x 750/200 мм
- ОАО «Центролит», Сумы, Украина. (2005/07 гг.). 2 линии. Производство ж/д литья «рама» и «балка», литье на заказ. Размер опок 3000 x 1800 x 500/500 мм, 3500 x 2500 x 500/700 x 900/1250 мм.
- ОАО «Благовещенский арматурный завод», Благовещенск, Россия (2006 г.). Производство стальной арматуры для нефтегазовой промышленности. Размер опок 1500 x 1500 x 900/500 мм, 1500 x 1500 x 380/380 мм.
- «Востокмашзавод», Усть-Каменогорск, Казахстан

- (2007 г.). 2 линии. Производство дробилок, арматуры, ж/д литья. Размер опок 3000 x 1800 x 500/500 мм, 3000 x 1800 x 500/500 мм.
- «Казцинкмаш», Риддер, Казахстан (2007–2008 гг.). Производство деталей дробилок, арматуры и др. Размер опок 2700 x 2700 x 1000/400 x 400/400 x 400/1000 мм
- «Днепропресс», Днепропетровск, Украина (2006 гг.). Производство корпусов вентилях, насосов, гидравлики. Размер опок 1600 x 1600 x 500/500 мм
- ВКМ-Сталь (Саранский «Центролит»), производство стального литья для железной дороги, размер опок 3000x1800x500/500 мм.

Список литературы

1. Мельников И. Три линии вакуумно-пленочной формовки на предприятии The Frog, Switch & Manufacturing Company, США // Литейщик России. – 2007. – №5.
2. Буданов Е.Н. Эффективность Вакуум-процесса на заводе North Vernon Industry Corp., США // Литейщик России. – 2007. – №7.
3. Смирнов М.Ю., Голенков Ю.В. Вакуум-процесс производства отливок чугунных ванн в России. // Литейщик России. – 2006. – №7.
4. Веревкин А. Отливки для крупнейшего производителя оборудования (мельниц, дробилок) – холдинга Sandvik // Литейщик России. – 2005. – №6. – С.41–46.
5. Буданов Е., Носкова Т. Производство отливок по вакуум-процессу для стройиндустрии Японии // Литейщик России. – 2006. – №10.
6. Буданов Е. Модернизация литейных производств арматурных отливок в странах Восточной Европы // Литейщик России. – 2006. – №3.
7. Буданов Е. Производство отливок арматуры (вентили, задвижки, фитинги, клапаны) // Литейщик России. – 2005. – №10. – С.11–18.
8. Вернинг Х., Вебер Ф. Технология вакуумно-пленочной формовки для производства высококачественных отливок // Литейное производство. – 2004. – №8. – С.15–17.
9. Вернинг Х., Вебер Ф. Технология вакуум-пленочной формовки для производства высококачественных отливок // Литейное производство. – 2004. – №10. – С.10–14.