



УДК 669.111.223; 669.046.562.2; 669.13.018

ПОЛУЧЕНИЕ МАРОЧНЫХ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ И ОТЛИВОК ИЗ НИХ С ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОСОРТОВЫХ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ПРИ ДВУХСТАДИЙНОМ ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОИЗВОДСТВА (ДУПЛЕКС-ПРОЦЕСС)

А. Т. ВОЛОЧКО, И. И. ВЕГЕРА, М. С. КОВАЛЬКО, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академика Купревича, 10. E-mail: volochkoat@mail.ru.

А. В. КОТКОВ, ОАО «Лидский литейно-механический завод», г. Лида, Беларусь, ул. Качана, 4.

В работе проведен анализ существующих способов подготовки и плавки дисперсных металлических отходов в виде стальной и чугунной стружки. Рассмотрена технология двухступенчатой плавки металлической шихты с использованием мультисоставного индукционного оборудования, позволяющая осуществлять расплавление стружки на промышленной частоте (50 Гц) и производить доводку состава и перегрев расплава чугуна перед последующим модифицированием на средних частотах (120–180 Гц) с автоматической подстройкой, учитывающей массу загрузки и ее состояние. Определено влияние соотношения стальной и чугунной стружки в шихте, технологических параметров индукционной плавки (частоты выходного тока, температуры и времени перегрева жидкого чугуна) на состав получаемых чугунов. Установлены температурно-временные режимы процессов плавки, науглероживания, легирования, микролегирования и рафинирования на различных стадиях duplex-процесса, позволяющие получать марочные чугуны с требуемым составом, углеродным эквивалентом и минимальным угаром основных компонентов сплава. Показано, что использование предложенной технологии позволяет получать марочные синтетические чугуны. Так, на примере литья в облицованный кокиль отливок распределительного вала с учетом установленных особенностей формирования необходимых свойств реализована технология их получения с градиентной структурой.

Ключевые слова. Синтетический чугун, индукционный нагрев, отходы, стальная и чугунная стружка, центрифугирование, плавка, облицованный кокиль.

PRODUCTION OF GRADED IRON-CARBON ALLOYS AND CASTINGS FROM THEM WITH GRADIENT STRUCTURE WITH THE USE OF LOW-GRADE IRON-CONTAINING WASTES AT TWO-STAGE PROCESS OF THEIR PRODUCTION (DUPLEX-PROCESS)

A. T. VOLOCHKO, I. I. VEGERA, M. S. KOVALKO, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus, 10, Akademika Kuprevich str. E-mail: volochkoat@mail.ru.

A. V. KOTKOV, OJSC “Lida Foundry and Mechanical Plant”, Lida, Republic of Belarus, 4, Kachana str.

The article analyses the existing methods of preparation and melting of dispersed metal wastes in the form of steel and cast iron shavings. The technology of two-stage melting of metal charge with the use of multi-frequency induction equipment, which allows to carry out melting of shavings at industrial frequency (50 Hz) and to carry out finishing of composition and superheating of cast iron melt before subsequent modification at medium frequencies (120–180 Hz) with automatic adjustment, tailored to the mass of the load and its condition, is considered. The influence of the ratio of steel and iron shavings in the mixture, technological parameters of induction melting (frequency of output current, temperature and time of superheating of liquid cast iron) on the composition of obtained cast irons has been determined. The temperature and time modes of melting, carburizing, alloying, microalloying and refining processes at various stages of duplex-process have been established, they allow to obtain grade cast irons with the required composition, carbon equivalent and minimum loss of basic components of the alloy. It is shown, that the use of the proposed technology makes the production of grade synthetic cast irons possible. Thus, the technology of their production with gradient structure is realized on the example of casting of camshaft castings in the lined coquille, tailored to the established peculiarities of formation of the required properties.

Keywords: Synthetic cast iron, induction heating, waste, steel and cast iron chips, centrifugation, melting, lined cauldron.

Введение

Создание рентабельной гибкой технологии и комплекса современного оборудования, позволяющих из разнородных дисперсных железосодержащих отходов получать качественные шихтовые материалы

и литейные сплавы, является актуальной и важной научно-технической и народнохозяйственной задачей снижения себестоимости продукции без снижения качества, повышения ее конкурентоспособности стоит перед каждым промышленным предприятием. Это в свою очередь тесно связано с ресурс- и энергосбережением, экологией. Для литейного производства наиболее весомым резервом является использование, возвращение в производство низкосортных дисперсных металлоотходов и сокращение энергозатрат на плавку металлов.

Организация переработки дисперсных отходов (стружки) в неподготовленном виде россыпью приводит к значительному снижению всех технико-экономических и экологических характеристик плавки: падает производительность, увеличивается удельный расход энергоносителей, флюсов, ферросплавов, модификаторов, снижается качество металла, возникает опасность взрывов, растут выбросы в окружающую среду. Использование холодных брикетов для переплава лишь в незначительной степени снижает перечисленные эффекты.

Для обеспечения максимального выхода металла при переплавке стружечных отходов необходимо удаление влаги, масла и других жидких примесей. Для удаления очень загрязненной стружки от масла и СОЖ (при их содержании более 6%) применяют центрифуги непрерывного действия, изготавливаемые как с вертикальным, так и горизонтальным расположением ротора [1, 2].

Для повышения эффективности удаления влаги может быть налажен дополнительный процесс сушки стружки в специализированных установках, нагрев может быть осуществлен как с использованием электромагнитного поля (рис. 1, а), так и сжиганием природного газа (рис. 1, б).

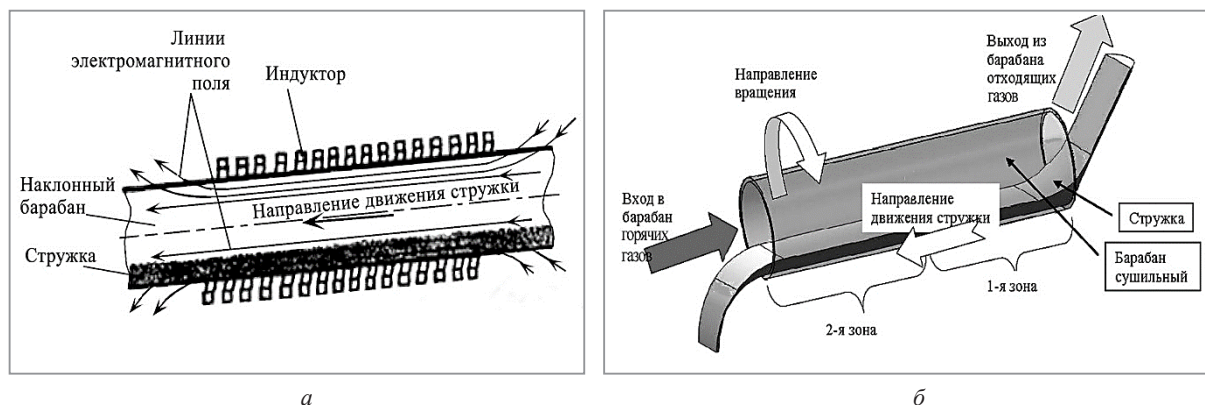


Рис. 1. Центрифуги непрерывного действия [3, 4]

Наиболее целесообразно использование технологической схемы, основанной на противотоке движения газа и непрерывной подачи стружки. Для такого рода установок реализуется процесс безокислительного нагрева за счет продуктов разложения масла, СОЖ и контролируемой подачи кислорода воздуха в зону горения [5]. Такие технологии могут быть реализованы на специализированных предприятиях. Обязательным условием их реализации является система очистки отходящих газов [6]. Однако дополнительная сушка существенно удорожает себестоимость получаемых отливок.

В последние годы в Беларуси были апробированы ряд технологий, совмещающих процесс температурной возгонки отходящих газов и компактирования отходов [7]. Так, апробирована технология горячего статического брикетирования металлических отходов в едином технологическом цикле (рис. 2), включающем дробильное устройство, ротационную газовую печь и горячее прессование на горизонтальном гидравлическом прессе.

При данной технологии возможно организовать безокислительный нагрев в среде пиролиза углеводородных соединений. Для снижения энергозатрат при горячем брикетировании пресс-формы могут быть выполнены с подвижной матрицей [8, 9]. Технологии горячего брикетирования позволяют исключить попадание влаги, масла и СОЖ в расплав и повысить прочность и плотность брикета, однако качество его все равно уступает плотному кусковому лому, а себестоимость горячих брикетов зачастую превышает стоимость первичных шихтовых материалов. Именно себестоимость конечной продукции при использовании горячих брикетов сдерживает ее массовое применение как в Республике Беларусь, так и в мировой практике.

Авторами [10] предлагается концепция рециклинга дисперсных железосодержащих отходов, исключающая процессы подготовки и окомкования (брикетирование, окатывание, агломерация). Для реализации этого процесса предложены ротационно-наклоняющиеся печи с управляемым газовым потоком. По

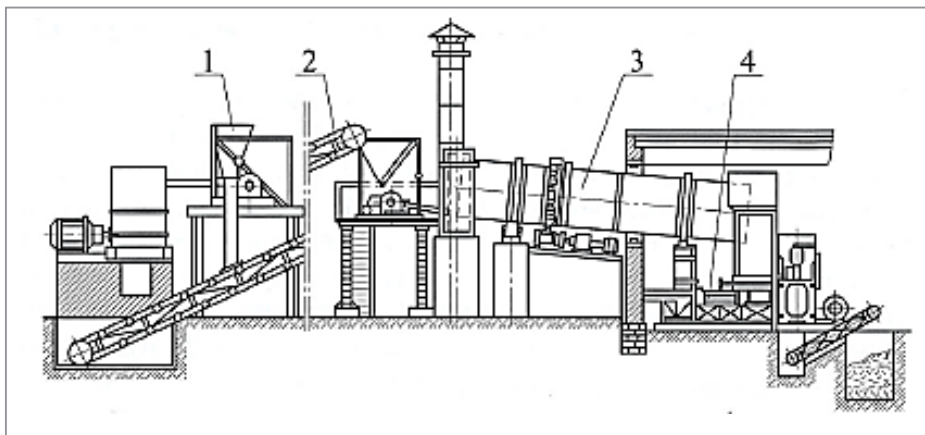


Рис. 2. Установка статического горячего брикетирования [7]:
1 – дробильное устройство; 2 – конвейер; 3 – ротационная печь; 4 – пресс

данной технологии возможно восстановление сильно окисленных дисперсных отходов размером менее 1–3 мм, так как процесс твердо-жидкофазного перемешивания может происходить в условиях контролируемого состава газов (продуктов разложения масла и СОЖ). Для контроля восстановительной среды такие установки дополнительно должны быть оснащены кислородной станцией. При этом игнорирование процессами десорбции воды, пиролиза органических, неорганических составляющих продуктов разложения масла и СОЖ в условиях непрерывной работы может приводить к пожарам, взрывам и загрязнению окружающей среды.

На сегодняшний день проблема рециклинга дисперсных отходов напрямую связана и с применением плавильных агрегатов. Основная масса стружечных отходов (до 400 тыс. т. в год) в Беларуси в виде холодных брикетов поставляется на БМЗ для переплава в дуговых сталеплавильных электропечах. Незначительная часть преимущественно сухой стружки может переплавляться и в индукционных печах. Это реализовано в филиале ОАО «ММЗ» в г. Столбцы, а также в УП «Технолит» (Могилев) и др.

Практика переработки лома стружечных отходов показала, что наиболее эффективным способом переплава подготовленной стружки является ее плавка в индукционных печах промышленной частоты (50 Гц) с предварительно подготовленным расплавом (не менее 2/3 объема тигля). На промышленной частоте также удобно реализуется и процесс науглероживания расплава. Для доводки сплава по требуемому составу (легирование, микролегирование, модифицирование) предпочтительно организовать процесс в индукционных печах средней частоты. Более интенсивное перемешивание не только обеспечивает усвоение легирующих элементов, но и минимизирует их угар.

В ОАО «ЛЛМЗ» реализована технологическая схема переработки сильно загрязненной стальной и чугуновой стружки классов 15А, 24А и 30Н, которая включает в себя предварительную очистку (центрифугирование) и двухстадийную ее переплавку на промышленной и средней частоте (дуплекс-процесс), а также последующую заливку расплава в облицованный кокиль (рис. 3).

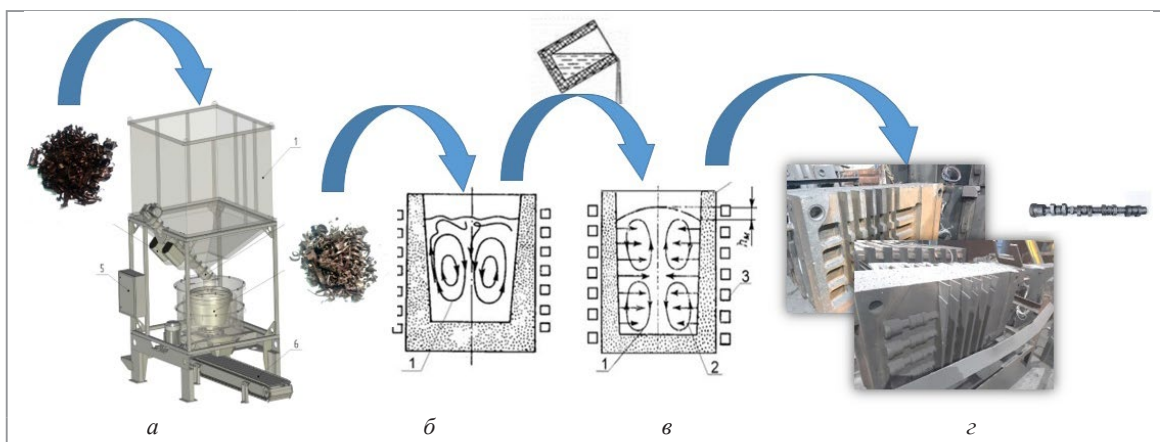


Рис. 3. Основные технологические этапы получения марочных синтетических чугунов с использованием металлической стружки в ОАО «ЛЛМЗ»: а – центрифугирование; б – расплавление стружки на частоте 50 Гц; в – доводка состава при автоматической подстройке частот 120–180 Гц; з – разливка металла в облицованный кокиль

Для использования сильно загрязненной стружки при получении марочных сплавов синтетического чугуна предложено включить в технологический комплекс процесс центрифугирования в непрерывном режиме, когда стружка захватывается лопастями ротора и под действием центробежных сил, передающихся от двигателя ротору, отделяется от масла и влаги. Количество масла, остающегося после такой операции, составляет 1–2 %.

Оснащение оборудования индукционной плавки мультисистотным преобразователем с переключаемым конденсаторным блоком позволило ему работать как при промышленных частотах 50 Гц, так и при средних частотах 120–180 Гц. Частота нагрева под плавку переключается дискретно с автоподстройкой контура, переключение обеспечивается с помощью высокочастотных контакторов, управляемых от общей системы ЧПУ, реализованной на основе промышленного контроллера. Система управления ЧПУ позволяет задавать все параметры плавки и сохранять режимы технологического процесса с возможностью его реализации в автоматическом режиме.

Методика проведения исследований

В качестве основных шихтовых материалов использовали стальной и чугунный лом, стальную стружку класса 15А, чугунную стружку класса 24А, а также стружку вне класса 30Н. Выплавку опытных сплавов чугунов различных составов осуществляли с использованием индукционных плавильных печей типа ИСВ и УВНК с переменной частотой в 2,4–8 кГц. Плавку в условиях ОАО «ЛЛМЗ» проводили двухстадийно: с использованием печей типа ИЧТ, работающих как на промышленных (50 Гц), так и на средних частотах (120–180 Гц) с их автоматической подстройкой. Для науглероживания расплава использовали добавки марки ГИИ фракцией 3–5 мм. Рафинирование расплава осуществляли за счет специальных шлакообразующих смесей, а модифицирование – бариевым модификатором ФС75Ба2.

На полученных отливках определяли микроструктуру, механические свойства (твердость, временное сопротивление при растяжении, относительное удлинение), а также химический состав.

Результаты и их обсуждение

Для отработки режимов плавки стружки в индукционных печах в условиях ФТИ НАН Беларуси проводили ряд экспериментальных исследований, направленных на определение корреляции между частотой тока, соотношением чугунной и стальной стружки в шихте и временем ее расплавления. При получении синтетических чугунов в индукционных печах для управления процессом растворения стружки в жидкой ванне тигля регулировали частоту в диапазоне от 2,0 до 8 кГц. Изменение скорости расплавления стальной и чугунной стружки в тигле в зависимости от частоты подаваемого на индуктор тока показано на рис. 4.

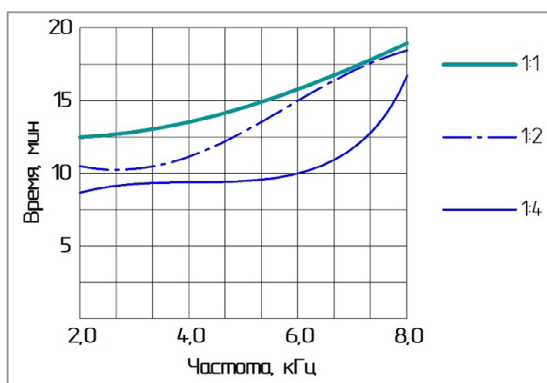


Рис. 4. Время расплавления шихты с различным соотношением стальной (С) и чугунной (Ч) стружки (С/Ч: 1/4; 1/2; 1/1) в зависимости от частоты тока

Из рисунка видно, что время расплавления стружки уменьшается со снижением частоты тока, при этом наименьшее время установлено при соотношении стальной и чугунной стружки 1:4. Следовательно, наиболее эффективно расплавление стружки в индукционных печах промышленной частоты, а доводка полученного расплава по составу, его перегрев и выдержка перед последующими операциями модифицирования и разливки – в печах повышенной частоты.

Экспериментальные плавки с использованием стальной и чугунной стружки проводили в лабораторной индукционной печи ИСВ 0,004 при частоте тока 2,4 кГц. В процессе плавки шихты контролировали

следующие параметры: соотношение очищенной стальной (С) и чугуновой (Ч) стружки, расход электроэнергии на плавку (кВт·ч), время расплавления шихты и полученный при этом угар. Эффективность расплавления стружки оценивали по времени ее полного растворения в расплаве, а также измерением времени, затраченного на достижение расплавом необходимой температуры. В табл. 1 приведены результаты эффективности расплавления стружки с различным ее соотношением в составе шихты.

В случае использования стальной и чугуновой стружки в соотношении 4:1 наблюдается минимальное время расплавления стружки, а также более низкая температура расплава получаемого чугуна (1350 °С). Наибольший сравнительный угар (12,1 %) отмечается в случае использования чистой чугуновой стружки. Это связано с ее относительно высокой дисперсностью (1–2 мм около 30 % и 1,0–0,2 мм около 45 %) и соответственно высокой реакционной способностью поверхности. Использование смеси стальной и чугуновой стружки позволяет уменьшать угар шихты, а также за счет уменьшения времени образования расплава снижать и расход электроэнергии в процессе плавки до 4,8 кВт·ч.

Таблица 1. Результаты экспериментальных плавков

Номер плавки	Соотношение стружки С: Ч *	Время расплавления стружки, мин	Температура расплава, °С	Расход электроэнергии на плавку, кВт·ч	Угар, %
1	1:1	16	1410	8	7,1
2	2:1	20	1440	10	9,3
3	1:2	14	1385	6,5	7,0
4	1:3	14	1380	6,0	8,3
5	1:4	10	1350	4,8	8,5
6	Только чугуновая	12	1355	5,4	12,1

* Загрязненность стальной стружки – 1,3%; чугуновой – 10,5%.

Важнейшим показателем качества приготовленного расплава чугуна является его химический состав, который обусловлен не только составом металлической шихты, но и используемыми науглероживателями, шлакообразующими и модифицирующими смесями. По результатам исследований полученного химического состава чугунов установлено, что оптимально в рассматриваемом случае использовать науглероживающие добавки типа СМ-80 и ГИИ фракцией 2–3 мм, а расход шлакообразующего и коагулирующего шлак флюсов должен находиться в пределах 0,5–0,7%. Модифицирование расплава чугуна для получения в структуре углеродистой фазы свободной формы (пластинчатый графит) следует проводить в количестве 0,4–0,5% от массы расплава. Химический состав плавков приведен в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав полученных чугунов

Номер плавки	Химический состав чугуна, мас. %				
	С	Si	Mn	S	P
1	2,51	1,20	0,44	0,11	0,08
2	2,40	1,11	0,48	0,08	0,02
3	2,55	2,31	0,46	0,07	0,03
4	2,88	2,20	0,52	0,10	0,04
5	3,21	2,25	0,55	0,09	0,02
6	3,48	2,55	0,65	0,13	0,09

Большее содержание стальной, чем чугуновой стружки в шихте (2:1), не позволяет добиваться необходимой для серых чугунов концентрации С (не менее 2,9% согласно ГОСТ 1412-85). Концентрация Si в этом случае находится в нижних минимальных пределах, однако при одновременном более низком содержании С содержание Si должно быть более высоким (свыше 1,9%) для создания необходимого углеродного эквивалента для полного протекания процесса графитизации чугуна. К примеру, твердость в полученных чугунах с низким углеродным эквивалентом хоть и находится на уровне 270 НВ, однако их прочность при растяжении (σ_B) заметно снижается до 110 МПа (рис. 5).

Микроструктурные исследования полученных чугуновых отливок после экспериментальных плавков с различным соотношением стальной и чугуновой стружки указывают на формирование наиболее дисперсного графита при использовании преимущественно чугуновой стружки (рис. 6), что подтверждает и более высокий уровень свойств. В данном чугуне наблюдается гнездообразная форма графита ПГф4 с длиной 15–25 мкм.

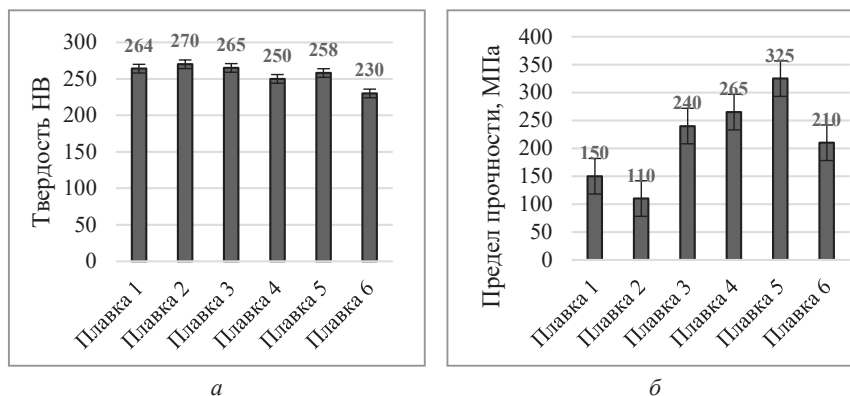


Рис. 5. Изменение твердости (а) и предела прочности при растяжении (б) чугунов, полученных с различным соотношением стальной (С) и чугунной (Ч) стружки в шихте: С: Ч – плавка 1 (1:1); плавка 2 (2:1); плавка 3 (1:2); плавка 4 (1:3); плавка 5 (1:4); плавка 6 (только Ч)

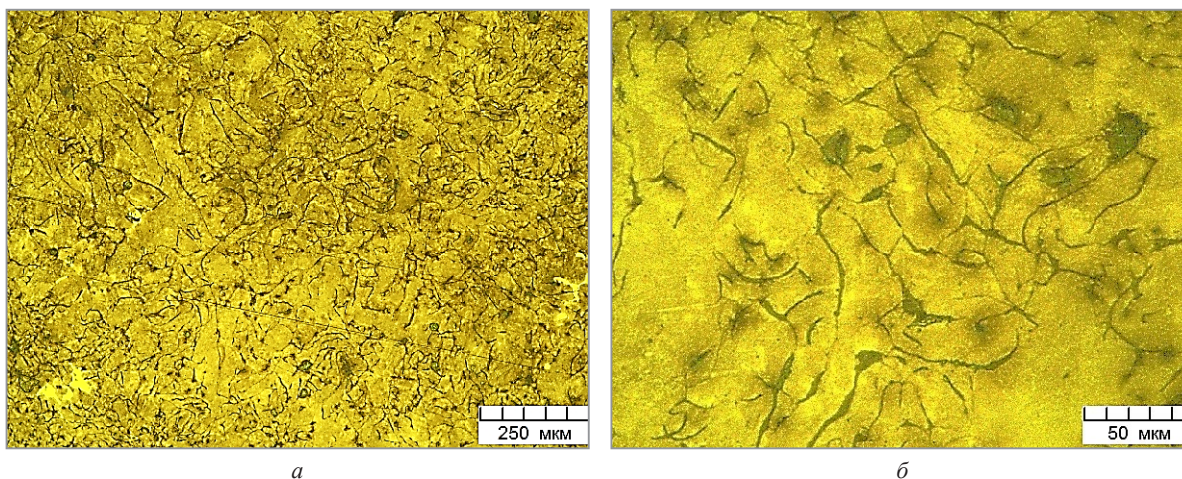


Рис. 6. Микроструктура чугуновых отливок, полученных при соотношении стальной и чугунной стружки 1:4 (плавка 5): а – $\times 100$; б – $\times 500$

Технология литья в облицованный кокиль с целью формирования различной структуры по сечению отливки предполагает использование в кокильной оснастке специальных вставок-холодильников и нанесение на ее рабочую поверхность высокотеплопроводной краски для создания различных условий кристаллизации отливки в отдельных ее участках. Данный способ позволил создавать градиент скоростей охлаждения отливки от 5–20 до 200–400 °C/с, что приводит к формированию гетерогенной структуры в сплаве. В областях с наиболее высокой скоростью кристаллизации расплава формируется метастабильная структура белого чугуна (так называемый отбел). В остальном сечении отливки формируется стабильная равновесная структура серого чугуна (Γ + Π + Φ), что позволяет создавать отливки с твердой и износостойкой поверхностью, но относительно вязкой сердцевиной.

Для оценки влияния толщины металлической вставки в песчаной на форме на формирование глубины отбеленного слоя были проведены серии экспериментальных плавки серого чугуна с его заливкой в технологические ступенчатые пробы из песка с металлическим дном (рис. 7, а).

С учетом проведенных исследований можно заключить, что выбор толщины металлической вставки-холодильника в чугуне для создания градиентных скоростей охлаждения расплава зависит от максимального сечения получаемой отливки. Экспериментальные данные указывают, что при максимальном сечении отливки чугуна в 30–40 мм для создания рабочего слоя белого чугуна толщиной 4–6 мм необходимо использование металлических вставок-холодильников толщиной более 10 мм (рис. 7, б).

В ОАО «ЛЛМЗ» успешно реализована конструкция кокильной оснастки с металлическими холодильниками для получения отливок «Вал распределительный» с направленной отбеленной зоной рабочей поверхности кулачков. Данная технология литья за счет градиентной скорости кристаллизации позволяет формировать на кулачках распределительных валов слой отбеленного чугуна твердостью более

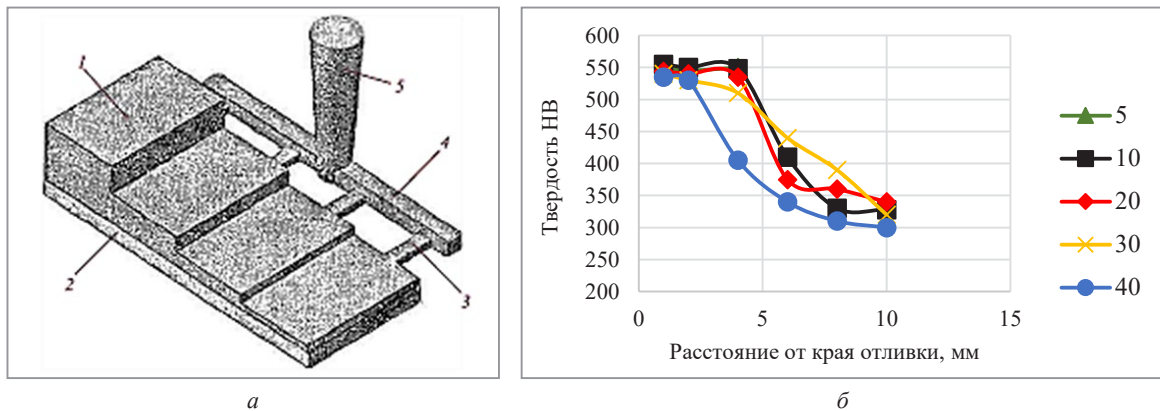


Рис. 7. Схема технологической пробы для изготовления ступенчатых отливок (а) и распределение твердости по сечению отливки различного сечения (5–40 мм) при кристаллизации на металлической подложке $h = 10$ мм (б): 1 – отливки; 2 – холодильник; 3 – питатель; 4 – литниковая система; 5 – стояк

500 НВ за счет формирования в нем ледебуритной эвтектики, состоящей из смеси Ц+П. Сердцевина же кулачка состоит из графитизированного серого чугуна, представляющего собой по структуре пластинчатый графит правильной формы, равномерно расположенный в перлитной металлической матрице дисперсностью 0,5–1,5 мкм (рис. 8). Полученные результаты стали основой для апробации технологии выплавки марочных синтетических чугунов с градиентной структурой с использованием мультисоставного преобразователя частоты при двухступенчатом нагреве и расплавлении стружки на первом этапе и доводки до состава и выдержки готового расплава на втором этапе.

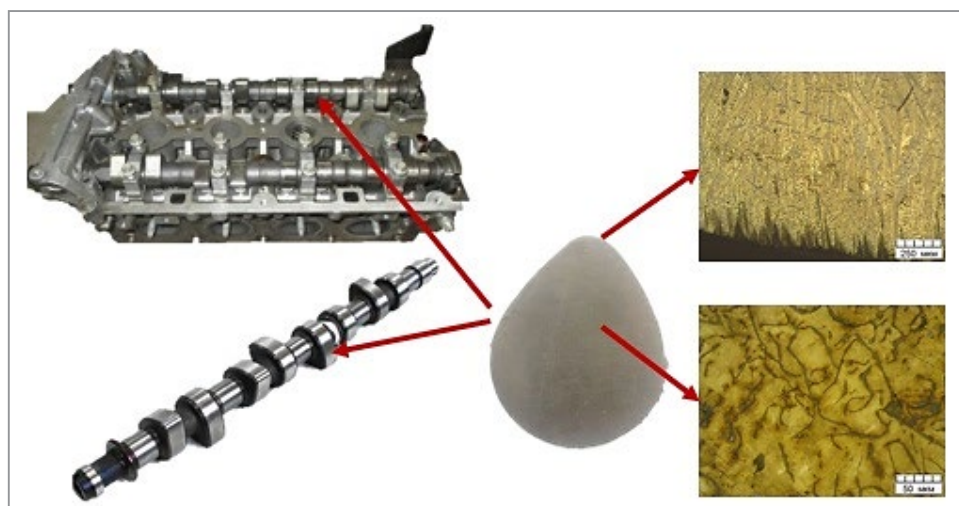


Рис. 8. Общий вид сечения кулачка распределительного вала и формируемая структура в различных его местах при градиентной кристаллизации

Таким образом, использование очищенной стальной и смешанной стружки снижает ее угар при переплавке с 15 до 6%, а чугуновой – с 20 до 7%, что значительно уменьшает себестоимость получаемых отливок из синтетического чугуна. При приготовлении расплава синтетического чугуна с использованием стальной и чугуновой стружки важным является их соотношение в шихте. Проведенные исследования показали, что оптимальное соотношение стальной и чугуновой стружки при плавке составляет 1:4. Использование такой пропорции очищенных стружечных отходов в шихте позволяет уменьшить время их расплавления на «болото» в 1,5 раза, что снижает энергозатраты на одну плавку на 30–40%. При доводке состава чугуна в индукционной печи на средних частотах и последующем модифицировании при получении углеродного эквивалента $C_s = 3,9–4,2$ структура получаемого чугуна состоит из равномерно распределенных графитовых включений в перлитной матрице, что позволяет достигать в литом состоянии твердости чугуновой отливки свыше 250 НВ и предела прочности (σ_B) свыше 320 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяконов, О.М. Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов / О.М. Дьяконов. – Минск: Технология, 2012. – 262 с.

2. **Аснер, В. И.** Конструкции и расчеты фильтрующих центрифуг / В. И. Аснер. – М.: Недра, 1976. – 216 с.
3. Переработка стальной и чугушной стружки на РУП «МАЗ» / П. С. Гурченко [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2007. – № 1. С. 106–110.
4. **Волочко, А. Т.** Переработка и использование алюминиевых отходов в производстве порошков, паст, композиционных и керамических материалов / А. Т. Волочко. – Минск: Бел. наука, 2006. – 302 с.
5. **Фонтана, П.** Безотходное производство стали / П. Фонтана, Р. Дегель // *МРТ*. – 2002. – № 23. – С. 46–55.
6. **Ровин, С. Л.** Переработка техногенных железосодержащих отходов / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 4. – С. 67–70.
7. **Дьяконов, О. М.** Теоретические и технологические основы получения композиционных шихтовых материалов из отходов черных металлов горячим прессованием: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.06 / О. М. Дьяконов. – Минск, 2012. – 369 с.
8. **Литвинко, А. А.** Технология горячего брикетирования отходов черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей / А. А. Литвинко // *Наука и техника*. – 2023. Т. 22. – № 5. – С. 367–375.
9. Получение высококачественного металлургического сырья из отходов металлообрабатывающего производства / Е. И. Марукович [и др.] // *Металлургия машиностроения*. – 2020. – № 2. – С. 31–39.
10. **Ровин, С. Л.** Рециклинг металлоотходов в ротационных печах / С. Л. Ровин. – Минск: БНТУ, 2015. – 381 с.

REFERENCES

1. **D'jakonov O. M.** *Kompleksnaja pererabotka struzhki i metallosoderzhashhih shlamov* [Complex processing of chips and metal-containing sludge]. Minsk, Tehnologija Publ., 2012, 262 p.
2. **Asner V. I.** *Konstrukcii i raschety fil'trujushhih centrifuge* [Designs and calculations of filter centrifuges]. Moscow, Nedra Publ., 1976, 216 p.
3. **Gurchenko P. S., Demin M. I., Mijljuk A. I., Skibar' A. M.** Pererabotka stal'noj i chugunnoj struzhki na RUP «MAZ» [Processing of steel and cast iron shavings at RUE “MAZ”]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2007, no. 1, pp. 106–110.
4. **Volochko A. T.** *Pererabotka i ispol'zovanie aljuminievyh othodov v proizvodstve poroshkov, past, kompozicionnyh i keramicheskikh materialov* [Processing and use of aluminum waste in the production of powders, pastes, composite and ceramic materials]. Minsk, Bel. Nauka Publ., 2006, 302 p.
5. **Fontana P., Degel' R.** Bezothodnoe proizvodstvo stali. *MRT*, 2002, no. 23, pp. 46–55.
6. **Rovin S. L., Rovin L. E.** Pererabotka tehnogennyh zhelezosoderzhashhih othodov [Processing of man-made iron-containing waste]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2015, no. 4, pp. 67–70.
7. **D'jakonov O. M.** Teoreticheskie i tehnologicheskie osnovy poluchenija kompozicionnyh shihtovyh materialov iz othodov chernyh metallov gorjachim pressovaniem: dis. ... d-ra teh. nauk: 05.16.06, Minsk, 2012, 369 p.
8. **Litvinko A. A.** Tehnologija gorjachego briketirovanija othodov chernyh metallov v press-formah s podvizhnoj matriciej [Technology of hot briquetting of ferrous metal waste in press forms with a moving matrix]. *Nauka i tehnika = Science and Technology*, 2023, vol. 22, no. 5, pp. 367–375.
9. **Marukovich E. I., Panteleenko F. I., D'jakonov O. M., Litvinko A. A., Sereda V. Ju.** Poluchenie vysokokachestvennogo metallurgicheskogo syr'ja iz othodov metallobrabatyvajushhego proizvodstva [Obtaining high-quality metallurgical raw materials from waste metalworking production]. *Metallurgija mashinostroenija = Metallurgy of mechanical engineering*, 2020, no. 2, pp. 31–39.
10. **Rovin S. L.** *Recikling metalloothodov v rotacionnyh pechah* [Recycling of metal waste in rotary kilns]. Minsk, BNTU Publ., 2015, 381 p.