

УДК 669.15

А. Н. Жигалов¹, доктор технических наук, доцент,**В. М. Головков**², **В. А. Земцов**³, **И. О. Сазоненко**⁴, **И. В. Кубраков**⁵¹Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru^{1, 2, 3, 4, 5}Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси», ул. Бялыницкого-Бирули, 11, 212030 Могилев, Республика Беларусь

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ ОТЛИВОК ИЗ СТАЛЕЙ ТИПА 45ХН2МФА ПРИ КОКИЛЬНОМ ЛИТЬЕ ДВУХФАЗНОЙ ШЛАКО-МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУЕЙ

Рассмотрены особенности макро- и микроструктуры отливок из стали типа 45ХН2МФА, полученных методом легирования стали 45 в процессе электрошлакового тигельного переплава с последующей совмещенной заливкой шлако-металлического расплава в металлические формы. Определено оптимальное значение высоты отливки для конкретного типоразмера металлической формы, позволяющей минимизировать объем последующей её механической обработки, обеспечивающей получение бездефектных заготовок, предназначенных для проведения в дальнейшем операции прокатки.

Ключевые слова: электрошлаковый тигельный переплав; литая сталь типа 45ХН2МФА; коэффициент использования материала.

Рис. 8. Табл. 3. Библиогр.: 8 назв.

A. N. Jigalov¹, DSc in Technical Sciences, Associate Professor,**V. M. Golovkov**², **V. A. Zemtsov**³, **I. O. Sazonenko**⁴, **I. V. Kubrakou**⁵¹Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy, the Republic of Belarus, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru^{1, 2, 3, 4, 5}State Scientific Institution “Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus”, 11 Byalynitskogo-Biruli Str., 212030 Mogilev, the Republic of Belarus

FEATURES OF THE PROCESS OF FORMING FLAT CASTINGS FROM 45KH2MFA STEELS BY TWO-PHASE SLAG-METALLIC JET CASTING

The features of the macro- and microstructure of castings made of 45KhN2MFA steel, obtained by alloying 45 steel in the process of electro slag cup remelting with subsequent combined pouring of the slag-metal melt into metal molds have been considered. The optimal value of the casting height for a specific type of metal mold, which minimizes the amount of subsequent mechanical processing and ensures the production of defect-free blanks suitable for further rolling operations has been determined.

Key words: electro slag cup refining; cast steel type 45KhN2MFA; material utilization factor.

Fig. 8. Table 3. Ref.: 8 titles.

Введение. В ИТМ НАН Беларуси в рамках работ по получению литых броневых материалов проводилось исследование процесса формирования отливок из стали типа 45ХН2МФА при их литье в металлические формы двухфазной струей. Цель проведения работ — определение оптимального значения высоты отливки, позволяющей минимизировать объем последующей её механической обработки, обеспечивающей получение бездефектных заготовок, предназначенных для проведения в дальнейшем операции прокатки.

Экспериментальные отливки получали заливкой в металлическую форму расплава металла и шлака, полученных в ходе проведения процесса электрошлакового тигельного переплава (далее — ЭШТП). Технология ЭШТП является разновидностью электрошлаковых процессов переплава, в которых расходуемый электрод, погруженный в расплавленный шлак, постепенно плавится, а капли расплава, стекая вниз, рафинируются при взаимодействии со шлаком. Шлак в разогретом состоянии находится за счет джоулевого тепла, возникающего при прямом прохождении электрического тока через жидкий шлак. Отличие

ЭШТП от процесса электрошлакового переплава в водоохлаждаемый кристаллизатор заключается в возможности накопления в плавильной емкости необходимого объема жидкого металла и шлака для последующего перелива в металлические формы [1—5].

Литье в металлические формы — широко распространенный в литейном производстве процесс [6; 7]. Металлическая форма, внутренний объем которой воспроизводит конфигурацию получаемой отливки, в литейном производстве чаще называют кокилем (фр. *coquille* раковина, скорлупа). Кокиль является постоянной формой, в которой можно получить не одну (как в песчаные формы), а множество отливок. Особенностью литья совмещенной двухфазной шлако-металлической струей в кокиль является хорошая защита жидкого металла при переливе его в форму (шлак, имея меньшую плотность, находится на поверхности жидкого металла), а также формирование на поверхности кокиля защитного шлакового гарнисажа, предотвращающего возможное взаимодействие расплавленного металла с материалом постоянной формы [8].

Материалы и методы исследования. Металлическая форма (рисунок 1) позволяла получать отливки длиной $565 \pm 1,5$ мм и шириной 133 ± 1 мм. Высота отливки регулировалась объемом (массой) заливаемого металла.

В таблице 1 приведены данные по массе расходуемых электродов и вводимых ферродобавок, использовавшихся при получении отливок из стали типа 45ХН2МФА методом легирования стали 45 в процессе ЭШТП.

Для проведения процесса ЭШТП использовалась смесь флюсов АНФ-295 и АНФ-6 в пропорции 50 : 50 в массовом соотношении. Масса используемого в процессе ЭШТП флюса составляла 3,5 кг на одну плавку.

Электрические параметры ЭШТП в процессе всех плавок не менялись: напряжение на источнике питания $U = 34 \pm 1$ В, сила тока в процессе переплава $I = 1\,800 \pm 150$ А.

Заливка шлако-металлического расплава в металлическую форму осуществлялась путем переворота на 180° плавильного тигля с закреплённой на нем формой (рисунок 2). Скорость вращения плавильной емкости с формой в процессе ее заливки в серии экспериментов оставалась постоянной и составляла $\omega = 0,209$ рад \cdot с $^{-1}$.

Химический состав отливок, полученных в ходе проведения работ по данному этапу, представлен в таблице 2.

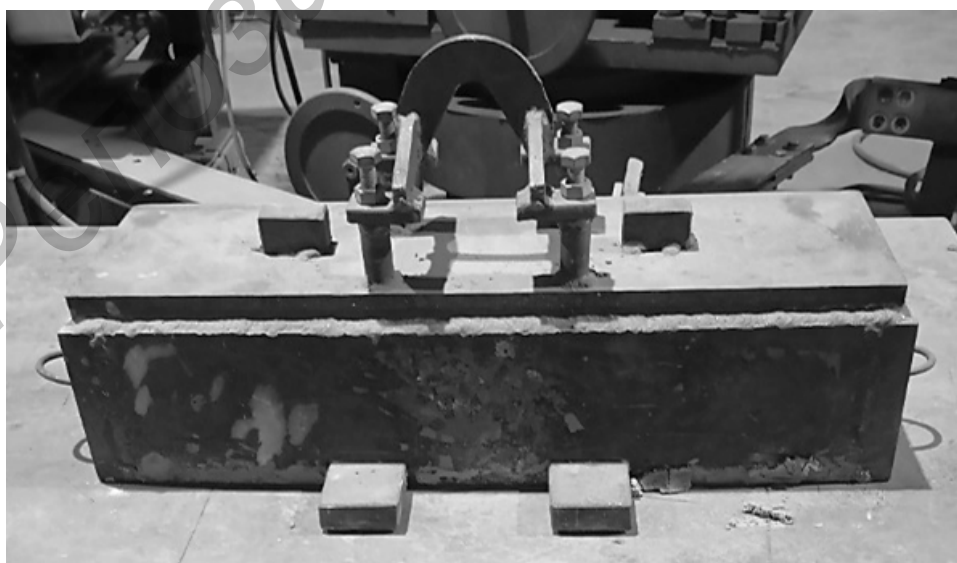
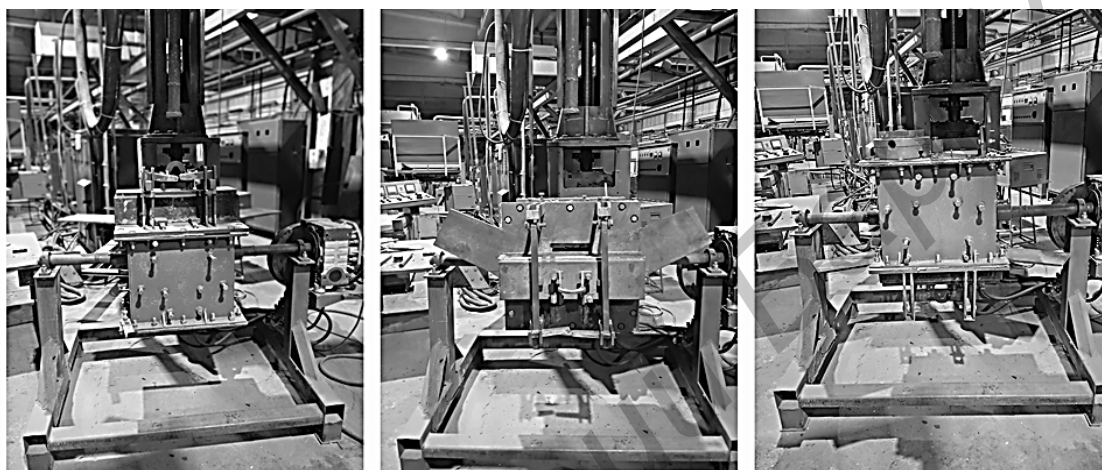


Рисунок 1. — Металлическая форма для литья двухфазной струей

Т а б л и ц а 1. — Шихтовый состав плавки, кг

Номер плавки	Шихтовые материалы						Всего
	Ст 45	Ферро-хром ФХ25	Никель Н1	Ферро-молибден ФМо60	Ферро-марганец ФМн78	Ферро-ванадий ФВн50	
1	9,67	0,15	0,15	0,05	0,037	0,025	10,080
2	19,33	0,30	0,30	0,10	0,075	0,050	20,155
3	29,00	0,45	0,45	0,15	0,112	0,030	30,162
4	38,65	0,60	0,60	0,20	0,150	0,100	40,300



а)

б)

в)

а — начало заливки; б — заливка; в — окончание заливки

Рисунок 2. — Процесс заливки шлако-металлического расплава

Т а б л и ц а 2. — Химический состав отливок ЭШТП, %

Химический элемент									
С	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Fe
0,261	0,162	0,493	0,010	0,029	0,901	0,630	1,350	0,106	Остальное
0,235	0,090	0,466	0,004	0,027	0,892	0,629	1,232	0,105	
0,218	0,072	0,456	0,003	0,027	0,909	0,633	1,245	0,105	
0,210	0,107	0,460	0,004	0,026	0,812	0,621	1,220	0,107	

В целях оценки макроструктуры отливок из них вырезались темплеты, представленные на рисунке 3.

Для выявления дефектов макроструктуры темплеты протравливались 50 %-ным раствором соляной кислоты согласно ГОСТ 10243-75 «Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры». Температура травящего раствора находилась в пределах 65 ± 3 °С. Время травления — 2 700 с.

В целях уменьшения площади обработки нижняя часть темплетов, расположенных в стеклянной кювете для травления, находилась в слое парафина марки П-2 ГОСТ 23683-2021 (рисунок 4).

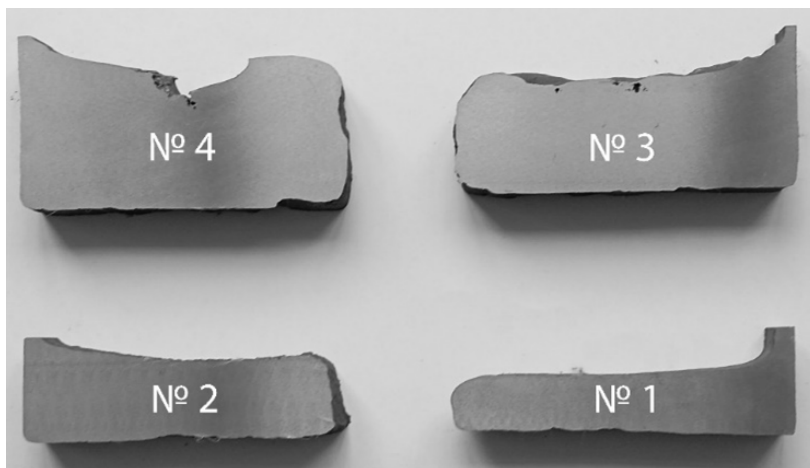


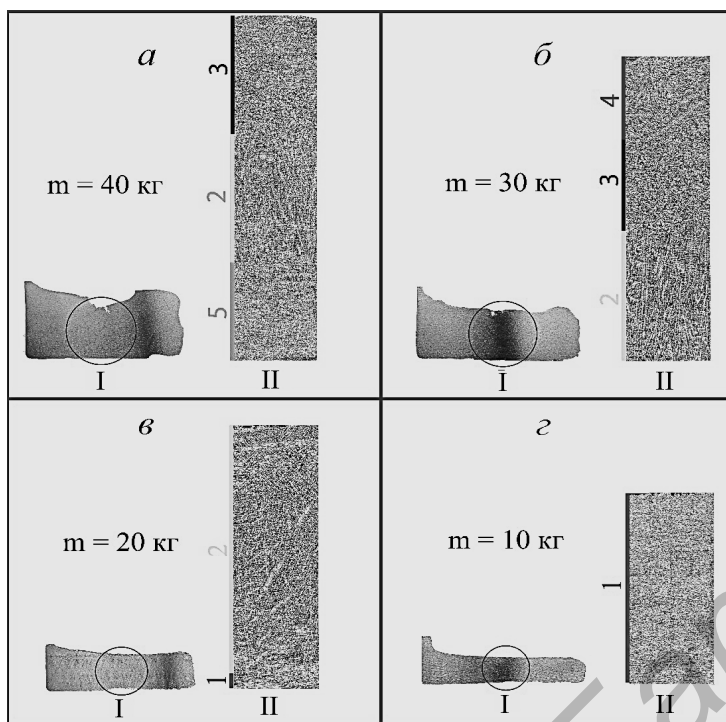
Рисунок 3. — Темплеты, полученные из отливок ЭШТП



Рисунок 4. — Темплет в кювете для травления

Результаты исследования и их обсуждение. Осмотр поверхности протравленных темплетов не выявил наличие в отливках подсадочной рыхлоты в верхней части отливок. На поверхности темплетов наблюдалось равномерное травление, что свидетельствует об отсутствии местной ликвации в объеме отливок. На рисунке 5 (I) представлены темплеты, вырезанные из соответствующих отливок и прошедшие операцию травления. На рисунке 5 (II) представлена микроструктура отливок из зон, выделенных красным контуром.

Анализ микроструктуры показал, что для отливки массой 10 кг по всей высоте отливки (зона 1) наблюдалась равноосная мелкозернистая структура с характерным размером зерна до 150 мкм. Отливка массой 20 кг характеризуется наличием в нижней части отливки незначительной зоны (зона 1, $L \approx 2$ мм) с равноосной мелкозернистой структурой, вся остальная часть отливки (зона 2) имеет явно выраженную столбчатую структуру с максимальными размерами зерен до 8 000 мкм. В отливке массой 30 кг в нижней части находится столбчатая структура (зона 2, $L \approx 23$ мм) с максимальными размерами зерен до 18 000 мкм. Над ней находится зона 3 ($L \approx 11$ мм), содержащая равноосную крупнозернистую структуру с размерами зерен до 600 мкм. Выше (зона 4) наблюдается равноосная крупнозернистая структура с элементами столбчатой структуры. В нижней части отливки массой 40 кг (зона 5, $L \approx 23$ мм) столбчатая структура с максимальным размером зерен до 1 000 мкм. Зона 2 ($L \approx 13$ мм) представляет собой зону столбчатой структуры с максимальным размером зерен до 6 000 мкм. Остальная часть отливки с равноосной крупнозернистой структурой, размер зерна — до 600 мкм.



а — масса отливки 40 кг; б — масса отливки 30 кг; в — масса отливки 20 кг; г — масса отливки 10 кг; 1 — равноосная мелкозернистая структура; 2 — столбчатая структура; 3 — равноосная крупнозернистая структура; 4 — равноосная крупно-зернистая структура + столбчатая структура; 5 — столбчатая структура

Рисунок 5. — Темплеты (I) и микроструктура отливок (II)

Для определения объема материала, который необходимо удалить с отливок в целях получения бездефектных заготовок, предназначенных для проведения последующей операции прокатки, строилась 3D-модель на основе представленных выше темплетов. На первом этапе изображение темплетов обрабатывалось с помощью редактора растровой графики Adobe Photoshop для получения четкого контура темплета и формирования итогового файла в формате PSD. Далее файл изображения загружался в программный комплекс системы автоматического проектирования SolidWorks. На его основе строилась 3D-модель отливок без учета краевых условий теплоотвода, возникающих в реальных условиях при затвердевании отливок в металлической форме (рисунок 6).

В целях определения коэффициента использования материала ($K_{им}$) для случая получения из отливок заготовок, предназначенных для проведения последующей операции прокатки, в сечении 3D-модели строился профиль будущих заготовок, вписанный в контуры сечения отливки (рисунок 7).

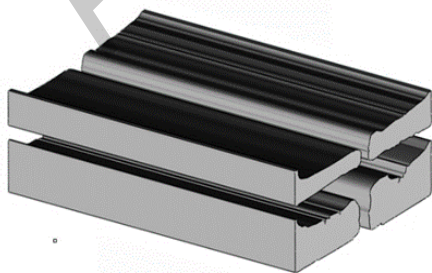


Рисунок 6. — 3D-модель отливок

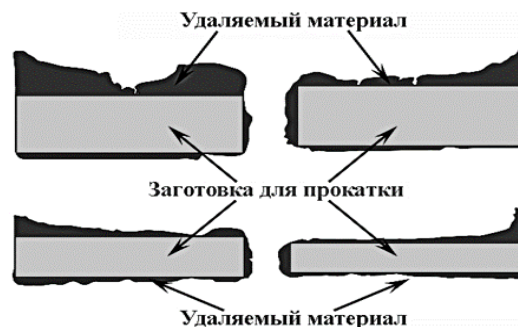


Рисунок 7. — Распределение удаляемого материала в отливках

В таблице 3 представлены расчетные значения объема удаляемого материала и $K_{им}$ при массах отливок 10, 20, 30 и 40 кг соответственно.

На рисунке 8 представлена зависимость коэффициента использования материала для отливок массой 10, 20, 30 и 40 кг при получении из них полуфабриката для последующей операции прокатки.

Заключение. Установлено, что при кокильном литье двухфазной шлако-металлической струей методом ЭШТП получают плоские отливки из стали 45ХН2МФА без подусадочных рыхлостей в верхней части отливок.

На поверхности темплетов, вырезаемых из плоских отливок из стали 45ХН2МФА, наблюдалось равномерное травление, что свидетельствует об отсутствии местной ликвации в объеме отливок. Отсутствие макродефектов в объеме отливок показывает, что литье двухфазной струей в металлические формы обеспечивает получение плотного беспористого литого материала.

Микроструктура плоских отливок характеризуется наличием дендритной структуры, что свидетельствует о наличии развитого процесса дендритной ликвации, влияние которого на физико-механические свойства металла возможно устранить с помощью последующей обработки давлением.

Анализ коэффициента использования материала для отливок массой 10, 20, 30 и 40 кг, предназначенных для получения из них полуфабрикатов, в последующем используемых при проведении операции прокатки, показал, что при данных геометрических размерах металлической формы наибольший коэффициент использования соответствует отливке массой 30 кг.

Литье в кокиль двухфазной шлако-металлической струей при методе ЭШТП обеспечивает формирование плоских бездефектных отливок из стали типа 45ХН2МФА заданного значения высоты, что позволяет минимизировать объем последующей её механической обработки перед проведением в дальнейшем операции прокатки.

Т а б л и ц а 3. — Коэффициент использования материала отливки

Масса отливки, кг	Масса удаляемого материала, кг	$K_{им}$
10	2,84	0,716
20	5,08	0,746
30	7,55	0,748
40	14,21	0,644

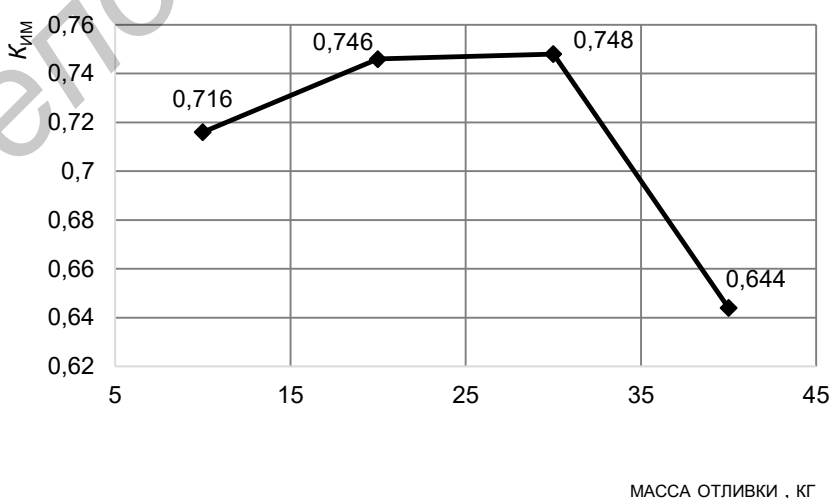


Рисунок 8. — Зависимость коэффициента использования материала от массы отливки

Список цитируемых источников

1. Целесообразность использования электрошлакового тигельного переплава для изготовления отливок из специальных среднелегированных сталей мелкими сериями / А. Н. Жигалов [и др.] // *Материалы и технологии*. — 2024. — № 1 (13). — С. 6—12.
2. Зависимость содержания легирующих элементов в отливке ЭШТП от их гранулометрического состава / А. Н. Жигалов, Л. А. Смирнов, М. С. Ковалёва [и др.] // *Металлургия сплавов — 2025* : сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., Могилёв, 5—6 июня 2025 г. — Минск : Колоград, 2025. — С. 45—46.
3. Жигалов, А. Н. Зависимость содержания легирующих элементов в отливке ЭШТП от времени их ввода в шлаковую ванну / А. Н. Жигалов, М. С. Ковалёва, И. О. Сазоненко // *Металлургия сплавов — 2025* : сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., Могилёв, 5—6 июня 2025 г. — Минск : Колоград, 2025. — С. 47—48.
4. Жигалов, А. Н. Определение влияния состава флюса на износ футеровки в процессе ЭШТП / А. Н. Жигалов, М. С. Ковалёва, И. О. Сазоненко // *Металлургия сплавов — 2025* : сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., Могилёв, 5—6 июня 2025 г. — Минск : Колоград, 2025. — С. 49—50.
5. Качество отливки из стали 45, получаемой заливкой в металлическую форму после электрошлакового тигельного переплава // А. Н. Жигалов, В. А. Логвин, А. Д. Мешков, И. О. Сазоненко // *Технологическое обеспечение машиностроительных производств* : сб. стат. Междунар. науч.-тех. конф., Могилев, 21—22 марта 2024 г. / БРУ. — Могилев, 2024. — С. 85—90.
6. Гини, Э. Ч. Технология литейного производства: специальные виды литья : учеб. для студентов высш. учеб. заведений / Э. Ч. Гини, А. М. Зарубин, В. А. Рыбкин ; под ред. В. А. Рыбкина. — М. : Академия, 2005. — 352 с.
7. Специальные способы литья : справочник / Б. А. Ефимов, Г. А. Анисович, В. Н. Бабич [и др.] ; под общ. ред. В. А. Ефимова. — М. : Машиностроение, 1991. — 436 с.
8. Электрошлаковая тигельная плавка и разливка металла / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, В. М. Мартын [и др.] ; под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев : Наук. думка, 1988. — 216 с.

Поступила в редакцию 14.10.2025.