

**Б. А. Кириевский, Е. Н. Александрова**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## ПОЛУЧЕНИЕ МОНО- И БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК НАМОРАЖИВАНИЕМ ИЗ РАСПЛАВА

*Рассмотрена современная технология получения заготовок из бронз, латуней, износостойких и коррозионных чугунов намораживанием непосредственно в расплаве. Описаны технологические особенности получения моно- и биметаллических отливок, приведены параметры процесса, в том числе температурные параметры расплава (ТВиО) и кристаллизатора, длительность выдержки в расплаве, особенности охлаждения биметаллических отливок. Представлены составы флюса и огнеупорных покрытий, сравнительные данные по свойствам и эксплуатационные характеристики изделий. Описаны принципиальные схемы оборудования и даны фотографии этого оборудования.*

**Ключевые слова:** намораживание, расплав, кристаллизатор, выдержка, критерий  $V_i$ , температурный градиент, свойства, толщина слоя, структура.

*Розглянуто сучасну технологію одержання заготовок з бронз, латуней, зносостійких і корозійних чавунів наморожуванням безпосередньо в розплаві. Описано технологічні особливості отримання моно- і біметалевих виливків, наведені параметри процесу, в тому числі температурні параметри розплаву (ТВиО) і кристалізатора, тривалість витримки в розплаві, особливості охолодження біметалевих виливків. Подано склади флюсу і вогнетривких покриттів, порівняльні дані за властивостями та експлуатаційні характеристики виробів. Описано принципи і схеми устаткування та наведено фотографії цього обладнання.*

**Ключові слова:** наморожування, розплав, кристалізатор, витримка, критерій  $V_i$ , температурний градієнт, властивості, товщина шару, структура.

*We consider the modern technology get mono and bimetallic castings from bronze, brass, cast iron wear-resistant and corrosion cast iron freezing directly in liquid. Describes the technological features of obtaining of mono and bimetallic castings, shows the process parameters, including melt temperature parameters (T<sub>ViO</sub>), and the mold, the duration of holding in the melt, cooling characteristics of bimetallic castings. Compositions are given the flux and refractory coatings. Comparative data on the properties and performance characteristics of products. We describe the concepts and equipment and given photographs of the equipment.*

**Keywords:** freering, melt, mold, hold, criterion  $BiO$ , the temperature gradient, properties, thickness, structure.

Литье намораживанием, в том числе из расплава на твердую заготовку, отличается от других известных технологий простотой, высокими производительностью и выходом годного, обеспечивает получение качественных заготовок и высоких физико-механических и специальных свойств металла.

Однако промышленное использование технологии для получения отливок из железоуглеродистых и цветных сплавов невелико, что связано как с отсутствием необходимых технологических рекомендаций, так и определенной инертностью мышления специалистов.

В ФТИМСе исследованы особенности процесса, разработаны и освоены технологии получения отливок намораживанием в расплаве на твердую заготовку ( $Q_p \geq Q_3$  и  $Q_p \gg Q_3$ , где  $Q_p$  – теплосодержание расплава,  $Q_3$  – теплосодержание заготовки), изучены влияние различных технологических факторов на параметры формирования твердой фазы и особенности структурообразования. При этом исследование было проведено при получении отливок из сплавов систем (Fe-C, Fe-Si-C, Cu-Al-Fe, Cu-Sn, Cu-Zu и др.).

Установили, что процесс намораживания целесообразно использовать для равно-стенных отливок предпочтительно симметричной конструкции с толщиной стенки 1,5-25,0 мм, процесс рационально осуществлять в плавильных агрегатах, например, высокочастотных индукционных печах, с возможностью регулирования температуры.

Для получения монометаллической отливки (например, втулки) целесообразно использовать кристаллизатор, в котором намораживание расплава производится на внутреннюю поверхность.

Биметаллические отливки (лемеха, двухслойные, втулки) получают, используя твердые заготовки, поверхности которых обработаны либо специальным флюсом, либо огнеупорным покрытием. Исследовали две принципиальные схемы подачи расплава в кристаллизатор – погружением кристаллизатора в расплав и подъемом расплава в кристаллизатор, например, при помощи МГД установки.

На отдельных этапах процесса по мере нагрева заготовки возможны процессы намораживания расплава, оплавление намороженного слоя и заготовки. Расчетные зависимости параметров каждой из указанных стадий получены расчетно-экспериментальным методом (экспериментальное определение чисел  $Bi$ ,  $Nu$  для конкретной пары «расплав-заготовка» и использование их значений в расчетных зависимостях). Длительность стадий определяется изменением температуры  $T$  (рис. 1, а) расплава, толщины  $\delta_{сл}$  слоя и диаметра заготовки (б).

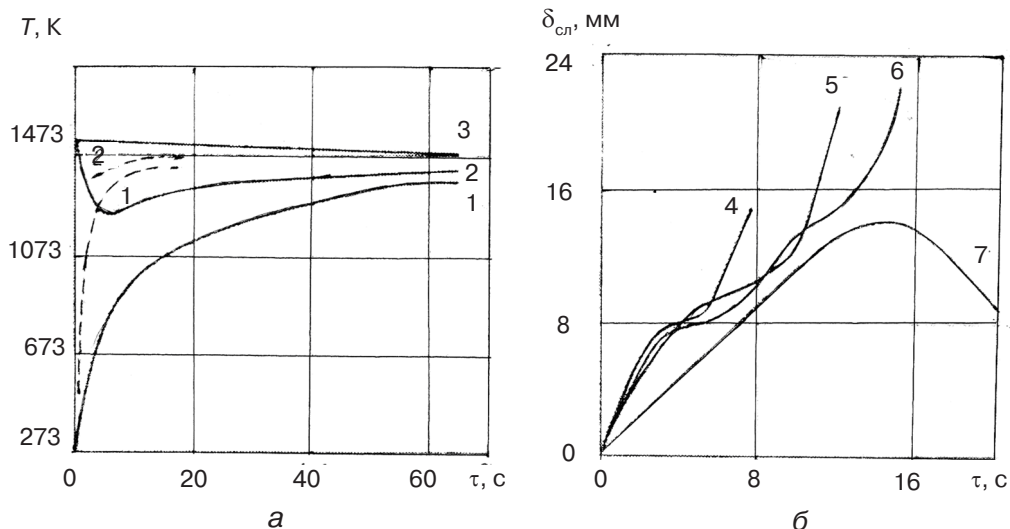


Рис. 1. Изменение температурного режима (а) и кинетика образования намороженного слоя (б) в зависимости от времени,  $\tau$ : 1 – заготовка; 2 – намороженный слой; 3 – расплав; диаметр отливки (мм) при  $T_p$ , К соответственно: 4 – 31; 1343; 5 – 42 (кристаллизатор с наружным кожухом); 6 – 44; 1323; 7 – 71; 1353-1373

В случае подачи расплава в полость кристаллизатора  $Q_{р1} \approx Q_{кр}$  ( $Q_{р1}$  – теплосодержание расплава 1-й группы,  $Q_{кр}$  – теплосодержание кристаллизации) длительность максимального теплоотвода и процесса намораживания расплава увеличивается. Установлены значения коэффициентов коррекции значений параметров процесса.

К числу принципиально новых следует отнести технологии получения биметаллических заготовок различной теплообменной арматуры, почвообрабатывающих деталей и различных втулок из бронз, латуней, алюминиевых и чугуновых сплавов.

Для получения заготовок испарительной арматуры доменных холодильников и теплообменных аппаратов для конденсации серной кислоты предусматривали намораживание на трубную заготовку различных сплавов, препятствующих насыщению углеродом материала арматуры (1-й случай) и защищающих от коррозионного воздействия среды (2-й случай). В первом случае намораживали сталь, легированную

кремнием, в дуговой печи ДСН-3, а во втором – ферросилид, содержащий ~14 % Si, в индукционной печи типа ИСТ-016. Установили идентичность характера зависимостей  $\delta_{\text{сл}} = f(\tau) \Delta T (\pm 10^\circ \text{C})$  и определили параметры, обеспечивающие формирование сплошного слоя  $\delta_{\text{сл}} = 3\text{-}5$  мм по всей поверхности заготовки. В зоне стыка в обоих случаях формируется прерывистый зазор ( $\delta \leq 0,1$  мм), который влияет на интенсивность выделения твердой фазы и определяется не только физическими свойствами расплава и заготовки, но и соотношением толщины заготовки и замороженного слоя. Неоднородность покрытия по толщине определяется как неравномерностью распределения температуры по объему расплава, так и различной длительностью нахождения в расплаве частей заготовки и дифференцированным теплоотводом по толщине расплава. Установили, что разнотолщинность замороженного слоя составляет 10-20 % на длину ~1 м.

Теплофизический расчет параметров процесса намораживания расплава на арматуру провели на основе решения системы дифференциальных уравнений второй степени с переменными границами. Эта система объединяет уравнения распространения теплоты Фурье для трубы и расплава, начальные условия и граничные условия в форме Стефана. Из-за большой сложности системы для ее решения провели ряд упрощений: температура расплава в процессе намораживания постоянная, теплоотдача от расплава к заготовке описывается граничными условиями третьего рода, распределение температуры в стенке заготовки описывается параболой  $n$ -й степени.

Установили, что значение  $k = Q_p/Q_3$  предопределяет максимально возможную толщину замороженного слоя и необходимую для ее достижения длительность  $\tau$  выдержки. При  $k$ , близком к 100, максимальная толщина слоя  $\delta_{\text{сл}} \leq 4,5$  мм ( $T_p \approx 1200^\circ \text{C}$ ), а  $\tau \approx 10$  с, при  $k$ , близком к 20,  $\delta_{\text{сл}}$  увеличивается до 10 мм, а  $\tau$  – до 20 с (рис. 2). Недостаточная  $\tau$  способствует образованию трещин в замороженном слое. Она должна определяться также с учетом реальных значений температуры заготовки  $T_3$  и замороженного слоя  $T_{\text{сл}}$ . Если  $T_{\text{сл}} < T_3$ , возникают трещины.

Установили, что для нанесения покрытия из ферросилида на трубные заготовки с  $\delta_{\text{сл}} = 3,5\text{-}5,5$  мм  $\tau$  при  $1240\text{-}1250^\circ \text{C}$  должна изменяться от 15 до 35 с. При намораживании ферросилида на твердую заготовку кремний перераспределяется по толщине замороженного слоя: у его наружной поверхности содержание кремния почти на 30 % выше (рис. 3). Это позволило с помощью базового состава ферросилида, содержащего кремния меньше 1-го порога устойчивости (что очень важно для технологичности сплава), обеспечить высокую коррозионную стойкость изделий.

Аналогичные зависимости получены при намораживании среднеуглеродистых и низколегированных сталей на трубную заготовку. Слой  $\delta_{\text{сл}} = 2,5\text{-}5,5$  мм формируется при  $T = 1600\text{-}1650^\circ \text{C}$  за  $\tau = 5\text{-}20$  с.

Используя экспериментально-расчетный метод, определили, что для указанной пары  $Bi = 0,5$ .

Расчеты показали, что при значении  $Bi > 1,5$  (рис. 4) прогрев стенки трубы достаточно интенсивный и при выдержке, равной 7 с, замороженный слой начинает плавиться, что недопустимо. При  $Bi < 1,5$  толщина замороженного слоя

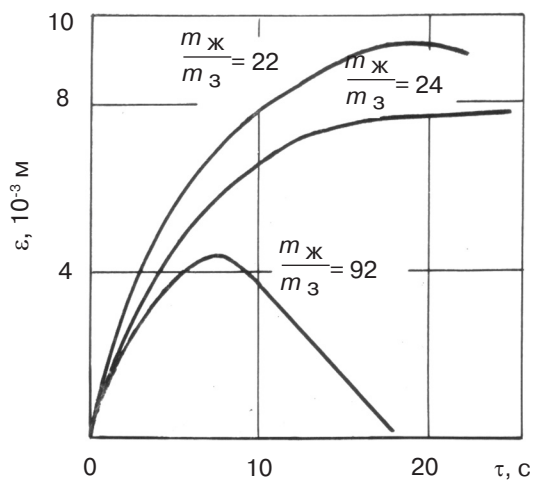


Рис. 2. Зависимость толщины замороженного слоя  $\varepsilon$  от времени выдержки и соотношения массы жидкого металла к массе заготовки

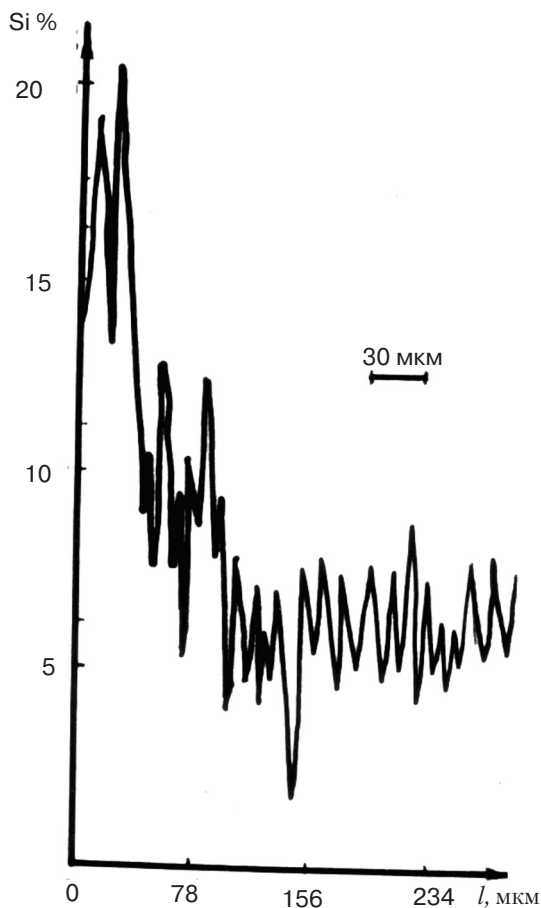


Рис. 3. Распределение кремния на участке  $\alpha = 0,3 \cdot 10^{-3}$  м

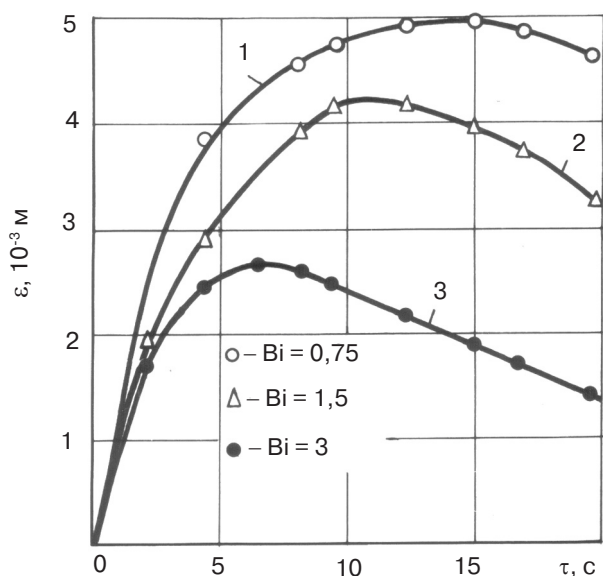


Рис. 4. Влияние коэффициента  $Bi$  на толщину намерзшего слоя ( $\epsilon$ )

существенно увеличивается, что не технологично. Поэтому для расчета толщины намерзшего слоя использовали значения  $Bi = 1,5$ .

Расчеты, проведенные при  $T_n = T_{кр}$ , показали, что расчетные значения толщины намерзшего слоя на 40-50 % отличаются от реальных. Соответствующий выбор величины  $T_n$  может существенно уменьшить расхождение расчетных и экспериментальных значений. Результаты расчетов показывают, что большее соответствие расчетных и экспериментальных значений получаем, принимая  $T_n = 0,7-0,6 T_{пл}$ , что при намерзании ферросилида соответствует 1113-1233 К.

Исходя из соответствующих значений физических величин, установили, что максимальная толщина (4,5 мм) намерзшего слоя при 1600 °С формируется за 16 (расчет) и 15 с (эксперимент). Подобные закономерности справедливы и для намерзания на заготовку с плоской поверхностью. Применительно к одностороннему и двухстороннему намерзанию определяются соответствующие значения поправочного коэффициента с учетом значений реального градиента нарастания температуры в объеме заготовки.

Сложнее установить зависимости формирования намерзшего слоя при необходимости получения прочного соединения между заготовкой и намерзшим слоем, так как в этом случае поверхность заготовки предварительно обрабатывается флюсом (например, АНШ-200), который существенно влияет на теплофизические свойства заготовки.

В ФТИМСе создана технология упрочнения деталей почвообрабатывающих машин (например, лемехов) методом намерзания из расплава. Заготовка с нанесением защитного слоя краски на нерабочую сторону и активирующегося флюса на рабочую подогревается до ~800 °С и выдерживается в расплаве хромистого износостойкого чугуна. В результате на рабочей стороне

стальной заготовки намораживается слой износостойкого чугуна толщиной 2,5-4,0 мм, который диффузионно связан с основой (рис. 5).

Используя данные экспериментальных замеров температур в различных сечениях лемеха и решая уравнения теплового баланса, включающие теплотокеты из расплава в заготовку и вдоль оси заготовки, получим следующую зависимость изменения температуры заготовки лемеха:

$$T = 0,88X^2 + C_1X + C_2, \quad (1)$$

где  $X$  – характерный размер, см;  $C_1$  и  $C_2$  – коэффициенты, зависящие от длительности выдержки и теплофизических параметров расплава.

Их значения определяются экспериментально.

При  $\tau = 5$  с  $T = 0,88 X^2 + 73,5 X + 961$ .

Скорость  $\omega$  нагрева заготовки



Рис. 5. Структура переходного слоя биметаллического лемеха

$$\omega = \frac{dT}{d\tau} = \frac{P}{S} \frac{q}{\rho c} - a \frac{\partial_2 T}{\partial X_2}, \quad (2)$$

где  $P$  и  $S$  – периметр и площадь выделенного сечения лемеха в точке  $X$ ;  $q_n$  – тепловой поток расплава к заготовке (наружный);  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности;  $\rho$  – плотность;  $C$  – удельная теплоемкость.

Учитываем, что

$$\omega = 405,4 \frac{P}{S} - 13. \quad (3)$$

Применительно к хромистому чугуну (9 % Cr; 3,1 % C)  $q_{вн} \ll q_n$ . Поэтому технологические приемы, направленные на изменение температуры заготовки по оси, малоэффективны. Сделанный вывод справедлив для получения теплообменных труб, защитных электродов и других длинномерных отливок с наружным намороженным слоем.

Особо следует остановиться на технологии намораживания при производстве отливок типа втулок из сплавов на основе меди, железа и алюминия.

Физико-механические свойства отливок, полученных методом намораживания, превышают уровень аналогичных у проката (таблица).

У всех сплавов существенно повышаются плотность и пластичность. Процесс фильтрационной подпитки расплава, способствующий повышению его плотности и устраняющий пористость усадочного происхождения, способствует существенному увеличению пластичности (на этапе зарождения магистральной трещины).

Параметры формируемой отливки определяются, прежде всего, теплофизическими характеристиками сплава и кристаллизатора, а также длительностью процесса намораживания. Двухстадийная кинетика процесса намораживания (для большинства толщин изделий) связана с формированием зазора между стенкой кристаллизатора и слоем намороженного металла. Определяли контактные термосопротивления между кристаллизатором и намороженным слоем по данным



**Физико-механические свойства отливок, полученных методом намораживания**

Марка сплава	Способ получения	Свойства			
		$\sigma$ , МПа	$\delta$ , %	НВ	$\rho$ , кг/см <sup>2</sup>
О5Ц5С5	намораживание кокиль прокат	270-300	30-37	70-74	9,2
		180	4	60	8,8
		320-440	10-16	60-65	9,0-9,1
О10С2НЗ	намораживание под давлением	350-380	14,6-19,8	116	9,2-9,3
		320	14-18	110	8,8-9,0
ВБрЗ	намораживание под давлением	670-790	4-6	-	-
		660-720	2,0-2,4	-	-
БрО10Ф1	намораживание кокиль прокат	320-330	18-23	95-107	9,2-9,3
		250	3	90	8,8
		250-350	20	90-120	8,6-8,76
БрА9ЖЗ	намораживание кокиль прокат	500-550	33-36	90-95	8,6
		500	12	100	-
		500	15	110-180	7,5
Лц40С	намораживание кокиль прокат	350-450	30-50	100-120	9,1
		220	20	80	-
		400-500	5-25	80-130	8,5

экспериментальных замеров методом подбора проб. В первый период намораживания коэффициент теплоотдачи максимальный  $\alpha_{кр} = 4 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup> · К) и изменяется по параболическому закону. Снижение  $\alpha_{кр}$  связано с образованием зазора. Через несколько секунд  $\alpha_{кр}$  стабилизируется. Описанная закономерность подтверждается и зависимостью  $\omega$  (см. рис. 1, б) изменения  $\delta_{сл}$  из бронзы О5Ц5С5. В интервале 3-6 с отметили скачкообразное уменьшение интенсивности роста намороженного слоя ( $\tau$  определяли размерами заготовки). Следовательно, методом намораживания предпочтительно получать заготовки, толщина стенки которых равна толщине формируемой до образования зазора, например, для рассматриваемого случая  $\delta_{сл} \leq 8-10$  мм. Здесь плотность металла и качество отливки максимальные.

Зависимость кинетики нарастания слоя намороженного металла от теплофизических параметров сплавов и намораживаемого расплава приведены на рис. 6:  $\delta_{сл}$  определяется длительностью выдержки кристаллизатора в расплаве, зависит от

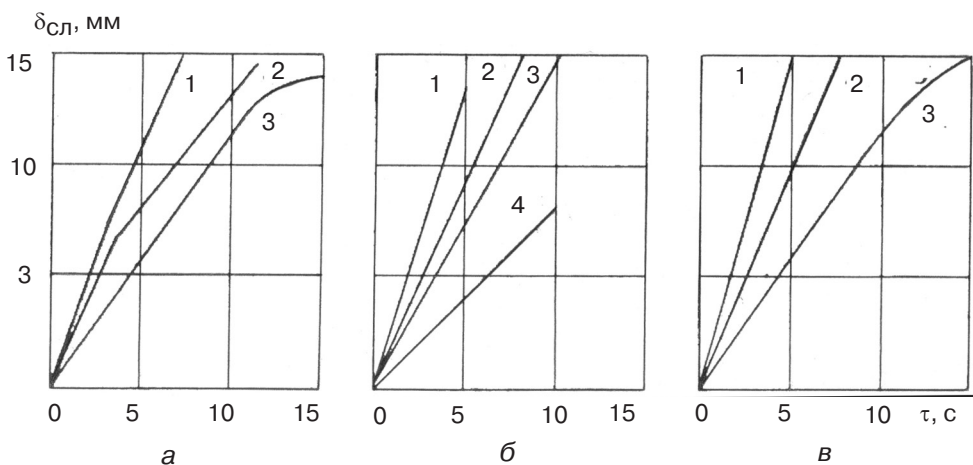


Рис. 6. Изменение толщины намороженного слоя во времени в зависимости от типа сплава на основе меди: а – БрВ23НЦ (1 –  $\varnothing$  33, 2 – 43, 3 – 72 мм); б – БрО5Ц5С5 (1 –  $\varnothing$  28, 2 – БрА9Ж4, 3 –  $\varnothing$  50, 4 –  $\varnothing$  55 мм); в – БрО10Ф1 (1 –  $\varnothing$  40, 2 –  $\varnothing$  50, 3 –  $\varnothing$  66 мм)

## Новые методы и прогрессивные технологии литья

$Q_{р1}/Q_{кр}$  и объема расплава, находящегося внутри кристаллизатора. Общий объем расплава влияет, прежде всего, на интенсивность изменения температуры кристаллизатора. Вращение кристаллизатора в расплаве, рекомендуемое в ряде работ, следует использовать только на этапе формирования наружной корки заготовки и не применять в условиях формирования внутренних и наружных слоев отливки, так как деформация кристаллического каркаса приводит к изменению условий фильтрационной подпитки кристаллизующейся отливки. Для каждого сплава с определенным значением интервала кристаллизации  $\Delta T = T_{л} - T_{с}$  и определенным соотношением  $Q_{р}/Q_{кр}$  характерна интенсивность роста твердой фазы  $v = 1-5$  мм/с. Предварительное охлаждение кристаллизатора в меньшей степени и снижение температуры расплава в большей влияют на интенсивность выделения твердой фазы.

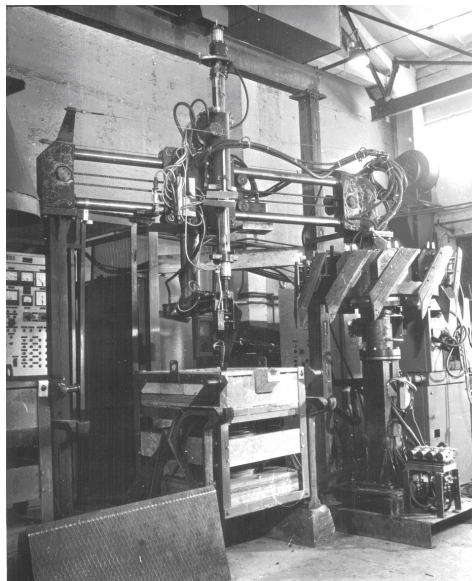


Рис. 7. Установка для намораживания лемехов износостойких чугунов

Сравнивая кинетику нарастания намороженного слоя при получении втулок  $\varnothing 50$  мм из бронзы О10Ф1 и О5Ц5С5, можно заключить, что влияние  $\Delta T$  на параметры процесса незначительно. Требование равномерности стенок заготовки обеспечивается при условии установки кристаллизатора или заготовки по оси плавильного объема. При этом разностенность намороженного слоя  $\leq 0,4$  мм. Поскольку припуск по внешнему диаметру составляет  $\leq 0,5$ , а по внутреннему –  $\leq 2,5$ , такую разностенность можно допустить.

Определение оптимальных параметров процесса намораживания с точки зрения качества отливок и уровня механических и специальных свойств намороженного металла позволило создать промышленные и лабораторные установки, общий вид и принципиальная схема которых представлены на рис. 7, 8.

Поступила 12.05.2012

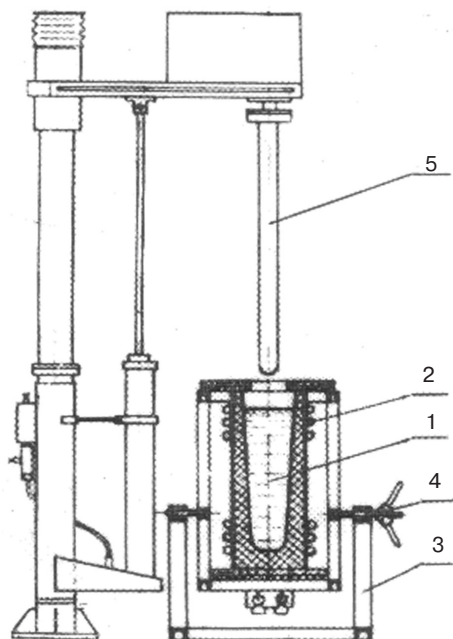


Рис. 8. Схема установки для намораживания ферросилида (~14 % Si) на стальную трубу: 1 – расплав; 2 – индуктор; 3 – стойка; 4 – поворотный механизм; 5 – труба кристаллизатора