



Шумихин В. С.

# 40 лет ИТМ НАН Беларуси

В. С. ШУМИХИН, Физико-технологический институт металлов и сплавов  
НАН Украины

УДК 621.74

## РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК СЛОЖНОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ СЕРОГО И ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

*The joint works within the period of 1980–1985 of ITM NAN of Belarus, Institute of casting problems of AN Ukraine and Kaunas works «Tsentrolit» in the field of grey and high-strength cast iron hardening, developments of crystallizers constructions and technologies of production of ingots of compound cross-section by method of horizontal continuous casting, are described.*

В начале 80-х годов прошлого столетия в Институте проблем литья АН Украины (сейчас Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины) осуществлялись измерения фундаментальных физических характеристик черных и цветных сплавов: парциальные и интегральные энтальпии образования сплавов, теплоты кристаллизации сплавов, температур фазовых превращений. Экспериментальные измерения проводили на основе систем тройных и четверных сплавов 3d-переходных металлов с металлоидами, во всем интервале концентраций полной растворимости компонентов с использованием высокоточных установок дифференциально-термического анализа и калориметров. Это позволило получить концентрационные и температурные зависимости физических характеристик сплавов многих систем, являющихся основой промышленных сплавов. Полученная в результате исследований база данных заинтересовала директора Института технологии металлов АН Беларуси Г. А. Анисовича, известного своими работами в области теплофизики и кинетики затвердевания отливок. Это послужило началом научных контактов с Институтом технологии металлов АН Беларуси, знакомства с ведущими сотрудниками и оригинальными разработками.

Вскоре представилась возможность осуществления совместных конструкторско-технологических разработок с ИТМ АН Беларуси: в рамках программы освоения новой техники при поддержке ГКНТ и Минстанкопрома СССР внедрялось производство чугуновых заготовок сложного сечения методом горизонтального непрерывного литья на Каунасском литейном заводе «Центролит». Для получения заготовок сложного сечения применяли кристаллизаторы с дифференцированным теплоотводом с целью обеспечения одинаковой толщины затвердевающего слоя в тонких и толстых элементах заготовки и обеспечения, тем самым, стабильности процесса непрерывного литья. Для расчета теплоотвода пригодились данные по теплотам кристаллизации, теплосодержанию сплавов, температурам фазовых переходов, нарабатывались в производственных условиях экспериментальные данные по термическому сопротивлению и теплоотводу для разных конструкций кристаллизаторов.

Производственные эксперименты и физическое моделирование осуществляли М. В. Жельнис, В. С. Кветинкас, А. С. Добровольскис, П. В. Землявичус, В. Н. Бабич, И. Г. Раздобарин и др. Это направление, которое обещало существенное рас-

ширение номенклатуры производства и повышение его рентабельности, активно поддерживал директор завода Э. П. Маяускас.

Модернизацию установок непрерывного литья с учетом теплофизики процесса выполнял Институт технологии металлов АН Беларуси. Е. И. Марукович и В. А. Земцов предложили использовать электромеханический привод новой конструкции и систему управления, обеспечивающие тонкое регулирование и возможность реализации технологии непрерывного литья заготовок сложного сечения.

Существует линейная связь между металлостатическим напором, приведенной толщиной заготовки и толщиной затвердевшего слоя. При величине металлостатического напора относительно оси кристаллизатора в пределах 0,2–1,0 м и приведенной толщины заготовки (площадь сечения/периметр) в пределах 0,005–0,050 м достаточно получить толщину наружного слоя соответственно 0,002–0,020 м, чтобы предотвратить разрыв слоя при вытягивании заготовки из кристаллизатора [1]. Шаг вытягивания и частота определяются конструкцией кристаллизатора, интенсивностью теплоотвода.

Для получения заготовок сложного сечения использовали сборные и литые кристаллизаторы с графитовыми вставками. Регулирование теплоотвода с целью его выравнивания в различных по размерам элементам заготовки осуществляли с учетом разной толщины стенок графитовой вставки путем применения теплопроводных паст, искусственных газовых зазоров между графитовой вставкой и корпусом кристаллизатора, а также путем организации потока охлаждающей воды в кристаллизаторе.

Разработку оптимальных конструкций кристаллизаторов с дифференцированным теплоотводом осуществляли расчетным путем с использованием системы зависимостей и экспериментальной базы данных, устанавливающих взаимосвязь в одном сечении заготовок между толщиной затвердевших слоев, их теплосодержанием, тепловыми потоками в зонах плотного контакта и зонах лучистого теплообмена и конструктивными характеристиками кристаллизаторов [2]. Далее в зависимости от тепловой мощности кристаллизаторов и скорости затвердевания чугуна определяли время остановки, шаг и время вытягивания заготовок, поток охлаждающей воды, параметры вторичного охлаждения, производительность процесса литья данной заготовки. Типовые конструкции кристаллизаторов для заготовок определенной конфигурации нарабатывались с учетом особенностей их затвердевания. Так, скорость литья существенно за-

висит от отношения тепловых потоков на узкой и широкой грани заготовки (рис. 1); по элементам заготовок сложного сечения скорость затвердевания изменяется от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $9 \cdot 10^{-4}$  м/с, при этом скорость затвердевания в наружных углах в 1,7–2,0 раза больше, а во внутренних углах заготовки на 1/3 меньше, чем на базовой плоскости; разность температур графитовой вставки по периметру в одном сечении может достигать 250 град, а положение фронта затвердевания по длине кристаллизатора в отдельных элементах заготовки сложного сечения может различаться на 10–12 см и т. д. [1].

Теплоты кристаллизации чугуна, затвердевающего при разных скоростях охлаждения, существенно отличаются вследствие различного соотношения в структуре областей первичного аустенита и эвтектики. Зависимость доли эвтектики от скорости охлаждения имеет принципиально одинаковый вид как для обычного, так и для синтетического чугуна – при быстром охлаждении увеличивается доля эвтектики. Эвтектическое превращение происходит при большем переохлаждении, а после распада пересыщенного аустенита образуется мелкопластинчатый перлит.

В случае затвердевания чугуна по стабильной системе имеются две твердые фазы – аустенит и графит. Теплота выделения графита при кристаллизации чугуна составляет 3660 Дж/г [3], а теплота кристаллизации аустенита существенно зависит от содержания в нем углерода и кремния (рис. 2). Чем больше растворено углерода в аустените, тем меньше теплота его кристаллизации. Изменения фазово-

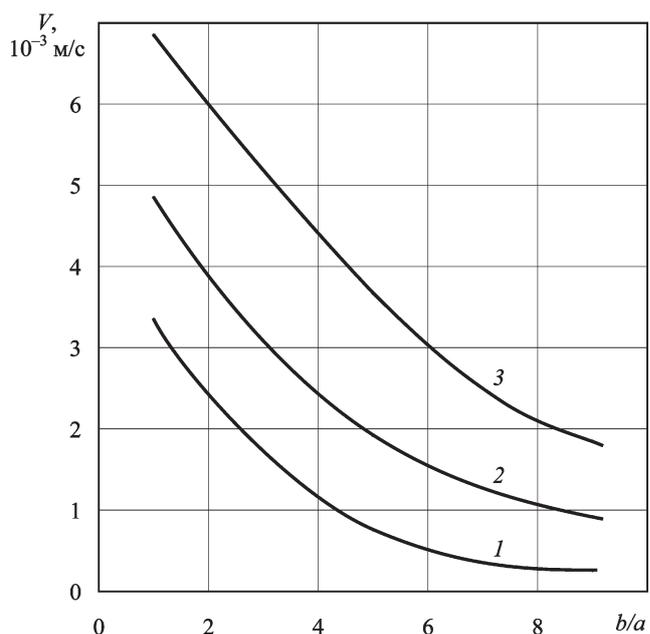


Рис. 1. Зависимость средней скорости литья прямоугольных заготовок от соотношения размеров широкой ( $b$ ) и узкой ( $a$ ) сторон: 1 –  $a = 0,1$  м; 2 –  $0,05$ ; 3 –  $0,03$  м

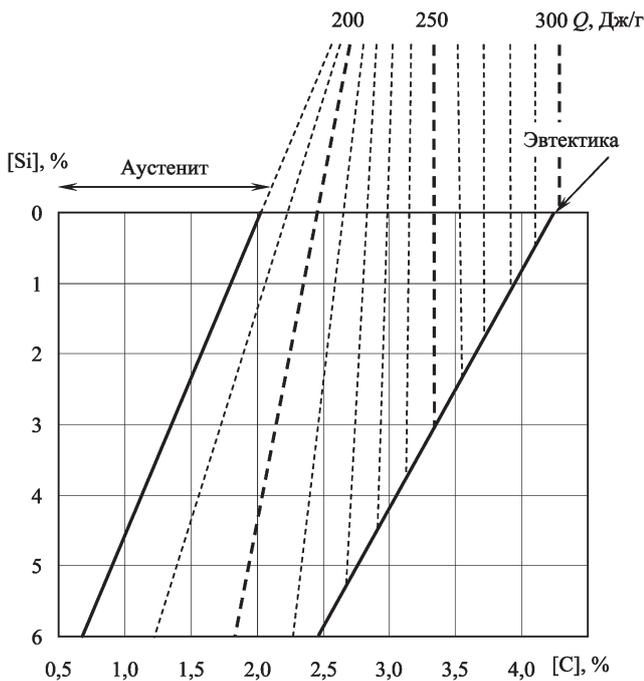


Рис. 2. Теплота кристаллизации сплавов системы Fe-C-Si

го состава чугуна, вызываемые изменениями состава, условий плавки, модифицирования или затвердевания, обязательно будут сопровождаться изменением теплоты кристаллизации сплава в целом.

Так, теплота кристаллизации аустенитно-графитной эвтектики с пластинчатым графитом равна 260 Дж/г, а эвтектики с шаровидным графитом – 230, цементитной эвтектики – 220 Дж/г ( $\pm 5$  Дж/г). Возьмем чугун состава 3,2% С и 1,80% Si, температура ликвидус этого чугуна 1479 К. Если принять эту же температуру как температуру ликвидус аустенита, последний должен содержать около 1,15% углерода ( $Q_{\text{крист.}} = 192$  Дж/г), а остальной углерод – 2,05% должен выделиться в виде свободного графита. Общая теплота кристаллизации такого чугуна составит:  $Q_{\text{спл.}}^c = 3660 \cdot 0,0205 + 192 \cdot 0,9795 = 263$  Дж/г.

В случае метастабильного затвердевания чугуна этого же состава весь свободный углерод должен перейти в цементит, теплота кристаллизации которого составляет 318 Дж/г [4]. Произведя расчет фазового состава белого чугуна, получаем теплоту его кристаллизации  $Q_{\text{спл.}}^b = 211$  Дж/г.

Знание теплоты кристаллизации сплавов позволяет рассчитать и оптимизировать время затвердевания отливки в зависимости от теплосодержания сплава и коэффициента теплопередачи, например по известному уравнению Н. И. Хворина [5]:

$$\tau = \chi Q^2 R^2, \quad (1)$$

где  $\chi$  – обобщенный коэффициент теплопередачи;  $Q$  – удельная теплота кристаллизации (Дж/г);  $R$  – приведенная толщина отливки, заготовки, м.

Обобщенный коэффициент теплопередачи в приведенном уравнении зависит от структуры чугуна в заготовке, определяется температурой заливки, конструкцией кристаллизатора, величиной теплового сопротивления между затвердевающим металлом и кристаллизатором.

Разница во времени затвердевания отливки, определяемая только различием теплоты кристаллизации белого или серого чугуна при прочих равных условиях, может достигать 20%, что имеет существенное значение для построения технологии непрерывного литья и производительности процесса.

В кристаллизаторе затвердевает только наружный слой заготовки, температура заготовки на выходе из кристаллизатора  $\approx 800$  °С, поэтому за один шаг снимается только часть теплосодержания металла:

$$W = [C_p^{\text{ж}} \Delta T + Q + C_p^{\text{тв}} (T_{\text{кр}} - T_{\text{заг}})] \cdot M, \quad (2)$$

где  $W$  – удельное теплосодержание, КДж/кг;  $C_p^{\text{ж}}$  и  $C_p^{\text{тв}}$  – удельная теплоемкость чугуна в жидком или твердом состоянии, КДж/(кг·К);  $(T_{\text{кр}} - T_{\text{заг}})$  – разница температур кристаллизации чугуна и температуры заготовки на выходе из кристаллизатора, °С;  $\Delta T$  – перегрев чугуна в металлоприемнике выше  $T_{\text{кр}}$ , °С;  $M$  – масса затвердевшего слоя заготовки за один шаг.

Учитывая, что обычно  $\Delta T$  составляет около 100 °С, а  $T_{\text{кр}} - T_{\text{заг}} \approx 250$  °С, вклад теплоты кристаллизации чугуна на динамику затвердевания наружного слоя заготовки (10–20 мм) очень значительный. Отводимая в кристаллизаторе теплота обычно составляет 450–500 КДж на 1 кг затвердевшего слоя заготовки.

В зависимости от скорости охлаждения существенно меняется структура серого чугуна (рис. 3).

Ускоренное охлаждение в поверхностном слое заготовок и связанное с этим переохлаждение расплава к началу эвтектической кристаллизации являются причиной формирования большого количества графитных включений, что оказывает непосредственное воздействие на их размеры – образуется междендритный и точечный графит. Наличие множества мелких и равномерно распределенных включений графита существенно сокращает путь диффузионного переноса углерода при эвтектоидном превращении, что приводит к полной ферритизации матрицы. При непрерывном литье заготовок из серого чугуна может образовываться заметный поверхностный слой с ферритной структурой и междендритным графитом. Наличие этого слоя облегчает механическую обработку, но в целом его принято характеризовать как «дефектную» зону (рис. 4).

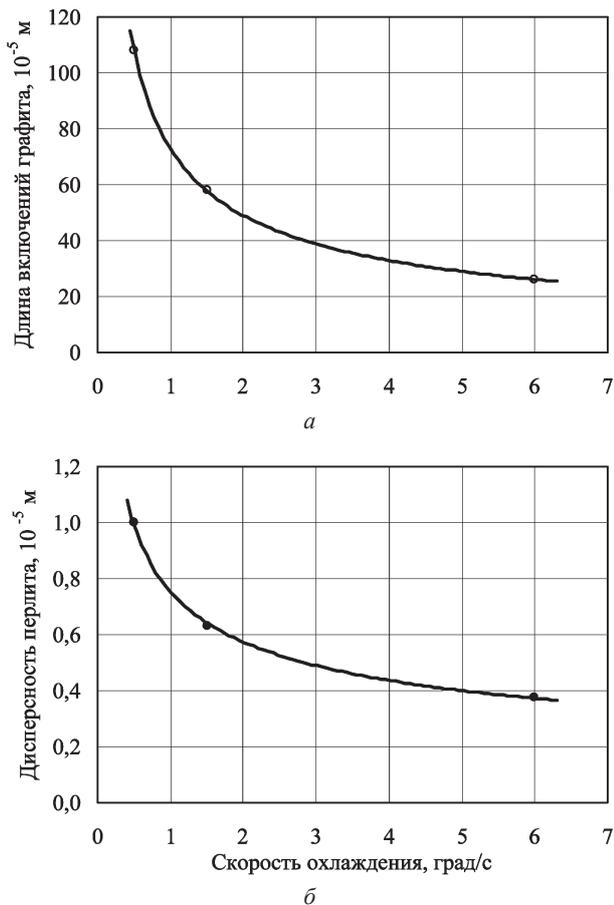


Рис. 3. Влияние скорости затвердевания на параметры графита (а) и перлита (б) при непрерывном литье серого чугуна

Уменьшается размер дефектной зоны при использовании кристаллизаторов с низкой тепловой мощностью, малого шага вытягивания и эффективной системы вторичного охлаждения.

Также эффективна корректировка состава серого чугуна и применение перлитостабилизирующих элементов (Cu, Sn, Sb, Mn) в небольших концентрациях.

На Каунасском заводе «Центролит» было освоено производство качественных заготовок сложного сечения более 100 типоразмеров из серого и легированного чугунов. В структуре чугуна преобладал, как правило, тонкопластинчатый перлит, включения графита равномерно распределенные, длиной в среднем 50–80 мкм.

Было освоено производство заготовок из чугуна с шаровидным графитом с применением модифицирования порошковой магниесодержащей проволокой. Подача проволоки в металлоприемник осуществлялась с пульта управления установкой непрерывного литья в автоматическом режиме соответственно режиму вытягивания заготовки и доливки жидкого металла в металлоприемник. Скорость подачи проволоки обеспечивала модифицирование чугуна в придонной части, непосредствен-

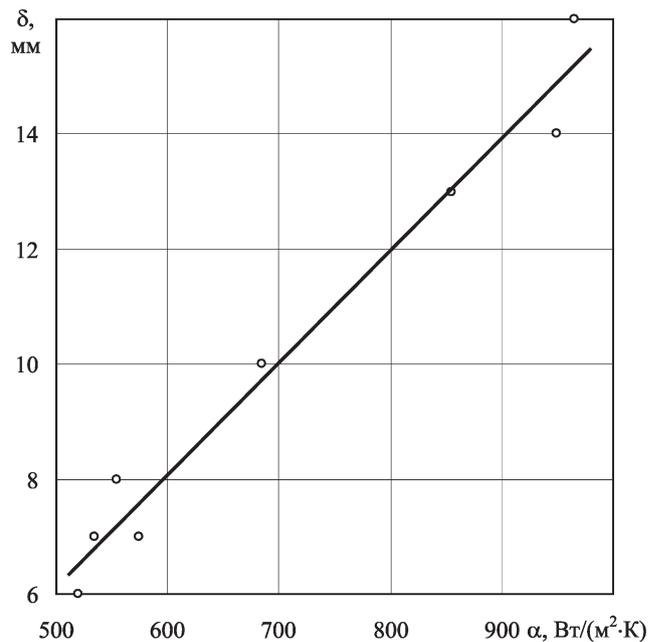


Рис. 4. Зависимость толщины «дефектной» зоны от значения коэффициента теплообмена при непрерывном литье заготовок из серого чугуна

но возле кристаллизатора. Автоматизация и эффективность модифицирования в сочетании с повышенной скоростью затвердевания обеспечивали высокую однородность структуры высокопрочного чугуна как по сечению, так и по длине заготовки.

Применяли проволоку диаметром 4,5 мм в стальной оболочке толщиной 0,4 мм, заполненную фрезерованным магнием (содержание магния 8 г/м). Система подачи позволяла регулировать скорость подачи проволоки от 0 до 5 м/с. Степень усвоения магния достигала 60%, этому способствовала низкая температура чугуна в металлоприемнике – обычно в области 1300 °С. При порционной доливке жидкого металла в металлоприемник установки непрерывного литья необходимо выдерживать следующее соотношение:

$$0,03 \leq \frac{mMg_{\text{ост.}}}{m + m_1} \leq 0,06, \quad (3)$$

где  $m$  – масса чугуна в металлоприемнике к моменту доливки очередной порции серого чугуна, т;  $m_1$  – масса доливаемого чугуна, т; 0,03 и 0,06 – граничное содержание магния в жидком чугуне, %;  $Mg_{\text{ост.}}$  – остаточное содержание магния в металле заготовки, %.

Обычно содержание  $Mg_{\text{ост.}}$  задается на уровне 0,03–0,04%. При одновременном непрерывном литье двух заготовок сечением 89×98 мм производительность линии составляла 2 т/ч. Заготовки прямоугольного и цилиндрического сечения использовали для изготовления гидроплотных деталей, работающих при давлении до 5 МПа [6].

Поверхностный слой заготовок из ВЧ толщиной 3–4 мм – ферритный, а размер глобулей графита 10–25 мкм, далее следует небольшая переходная зона с ферритно-перлитной основой, основной объем заготовок имеет перлитную основу, размер глобулей графита 25–40 мкм. Цементитной фазы в структуре высокопрочного чугуна с углеродным эквивалентом 3,8–4,2% не наблюдалось.

Плотность заготовок очень высокая за счет значительного предусадочного расширения металла при затвердевании и жесткости формообразующего кристаллизатора. В центральной зоне цилиндрических заготовок диаметром от 40 до 150 мм пористость или крупнокристаллическое строение не наблюдалось. Были установлены технологические параметры стабильного получения заготовок из высокопрочного чугуна марок ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ55.

Удельная теплоемкость чугуна с шаровидным графитом при комнатных и повышенных температурах выше почти на 20%, чем теплоемкость серого чугуна, а теплопроводность высокопрочного чугуна (~30 Вт/(м<sup>2</sup>·К)) ниже, чем серого чугуна (~44 Вт/(м<sup>2</sup>·К)) почти на 50% [7], что отражается на времени затвердевания заготовок и производительности установок непрерывного литья. Так, про-

изводительность снижается при изготовлении заготовок из высокопрочного чугуна на 15–20% по сравнению с такими же заготовками из серого чугуна.

По результатам совместных исследований и конструкторско-технологических работ на Каунаском заводе «Центролит» был создан автоматизированный цех непрерывного литья заготовок сложного сечения из серого, низколегированного и высокопрочного чугунов на основе оригинальной технологии. Минстанкопромом СССР были утверждены типовой технологический процесс и типовые конструкции кристаллизаторов РТМ 2 Н83-58-85 [2].

Опубликовано по результатам работы более сотни статей, получено более 50 авторских свидетельств на изобретения и патентов. В 1985 г. коллективу сотрудников завода и научных институтов была присуждена премия Совета Министров СССР.

В 1991 г. в справочнике «Специальные способы литья» [8] появилась глава по непрерывному литью на установках горизонтального типа, созданная на основе исследований и многолетнего производственного опыта. Описанные работы послужили началом плодотворной деятельности Института технологии металлов НАН Беларуси в области непрерывного литья.

### Литература

1. Ж е л ь н и с М. В., Ш у м и х и н В. С. Материалы 58-го Международного конгресса литейщиков. Краков, 1991. С. 73–78.
2. Литье чугуна непрерывное на установках горизонтального типа. Типовые конструкции кристаллизаторов с графитовыми вставками. РТМ Н83-58-85, Минстанкопром СССР, 1985.
3. W l o d a w e r R. Gelenkte Erstarrung von Gusseisen. Düsseldorf. 1977. S. 554.
4. Gisserei – Praxis. 1972. N 5. S. 71–82.
5. Х в о р и н о в Н. И. Затвердевание отливок. М.: Металлургия, 1955.
6. П о х о д н я И. К., А л ь т е р В. Ф., Ш у м и х и н В. С. // Процессы литья. 1993. № 1. С. 3–8.
7. Чугун: Справ. / Под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. М.: Металлургия, 1991.
8. Специальные способы литья: Справ. / Под ред. В. А. Ефимова. М.: Машиностроение, 1991.