



The results of investigations of physical-mechanical characteristics of cast iron slugs, received by semicontinuous way of casting, at temperatures from 850 up to 1100 °C are given.

А. Н. КРУТИЛИН, Р. Л. ТОФПЕНЕЦ, М. Ю. ЛЕДНЕВА, БНТУ

УДК 621.746

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЧУГУНА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Совершенствование способов непрерывного литья машиностроительных заготовок из чугуна возможно только на основе тщательного анализа процессов, происходящих при формировании непрерывной отливки. Стабильность процесса литья определяется условиями формирования начальной корки и ее толщиной на выходе из кристаллизатора.

На выходе отливки из кристаллизатора интенсивность охлаждения падает, что ведет к повышению температуры ее поверхности. Процесс разогрева продолжается до тех пор, пока тепловой поток с поверхности отливки в окружающую среду и через тело отливки не уравнивается. Именно в это время температура поверхности достигает максимального значения. С ростом температуры поверхности замедляется процесс затвердевания, увеличивается средняя температура затвердевшей корки, уменьшается ее прочность.

Практика показывает, что при непрерывном литье чугуна из кристаллизатора обычно извлекается оболочка с жидкой сердцевиной и толщиной стенки 5–10 мм. Температура поверхности отливки после разогрева при этом достигает 1000–1100 °C.

Для стабильного процесса необходимо обеспечить получение на выходе из кристаллизатора достаточно прочной корки, способной противостоять суммарным напряжениям, возникающим в заготовке в процессе литья. В затвердевающей корке возникают термические напряжения, вследствие перепада температур по толщине, и напряжения, вызванные действием металлостатического напора и усилий вытягивания заготовки из кристаллизатора. В случае если суммарные напряжения в каком-либо месте превысят прочность затвердевшего металла, происходит прекращение процесса.

Расчетное определение оптимальных технологических параметров процесса затруднено из-за отсутствия данных о величине напряжений, действующих на отливку, физико-механических свой-

ствах чугуна (коэффициенте термического расширения, пределе прочности на растяжение) при высоких температурах.

В статье приведены результаты исследований физико-механических свойств чугунных заготовок, полученных полунепрерывным способом литья при температурах от 850 до 1100 °C.

Измерение коэффициента термического расширения проводили на dilatометре “Netzsch Geratebau GmbH” (Германия), с помощью которого можно производить непрерывную регистрацию изменения длины исследуемого образца под действием температуры в автоматическом режиме. В связи с тем что регистрируемое удлинение состоит из изменений размера образца, частей чувствительного элемента, а также системы держателей, находящихся в горячей зоне печи, для определения истинного изменения длины образца необходимо было провести калибровку в сравнении со стандартным образцом с известными свойствами. В качестве стандартных образцов использовали кварц и “Vacromium”. Калибровку проводили при одинаковых условиях измерения исследуемых и стандартных образцов. При проведении исследований использовали ступенчатый режим нагревания: подъем температуры до 900, 1000 и 1100 °C со скоростью 10 °C/мин с выдержкой при этих температурах в течение 30 мин. На первом этапе вычисляли погрешность измерения путем сравнения относительного удлинения стандартного образца с его табличными данными. Полученное значение суммировали с номинальным значением, считываемым с dilatограммы исследуемого образца, а сумму использовали для расчета коэффициента термического расширения. Испытания проводили в вакууме $(3-8) \cdot 10^{-5}$ МПа. Образцы диаметром 6 мм и длиной 25 мм вырезали из поверхностного слоя заготовок, отлитых непрерывным способом.

Эксперименты проводили на чугунах, имеющем следующий химический состав: С — 3,0–3,7%, Si — 1,7–2,4, Mn — 0,2–0,9, P — 0,04–0,4, S — 0,04–0,06%, а также на антифрикционном чугуна АЧС-2 с содержанием легирующих элементов Cr — 0,1–0,5%; Ni — 0,1–0,5; Cu — 0,2–0,6; Ti — 0,03–0,12%. Химический состав испытанных образцов для чугуна АЧС-2 колебался в пределах, рекомендованных ГОСТ 1585-85 или несколько выходил за эти пределы.

В исследованных чугунах коэффициент термического расширения в диапазоне температур 900–1100 °С изменяется от $6 \cdot 10^{-6}$ до $26,8 \cdot 10^{-6}$ 1/град, причем большие значения имеют чугуны с более высоким содержанием углерода. В литературных данных [1, 2] имеются сведения, что Cr, Cu, Ni, Si способствуют некоторому увеличению коэффициента линейного расширения в диапазоне температур до 1000 °С. Однако полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что влияния химического состава в исследованных пределах на коэффициент линейного расширения при температурах 1000–1100 °С не установлено.

Имеющиеся в литературе [3, 4] данные о прочности серого чугуна ограничены интервалом температур 700–800 °С. Вопрос о влиянии скорости нагружения при этом не рассматривается. Специфические условия формирования отливки при непрерывных способах литья оказывают влияние на микроструктуру и субструктуру поверхностных слоев заготовок.

Определение предела прочности чугуна проводили при температурах 850–1100 °С и скорости нагружения 0,17–107 мм/мин. Исходная структура матрицы чугунных образцов ферритная, с формированием графита в междендритных промежутках (рис. 1). Исследования проводили на универсальной машине 1253 У-2 с использованием образцов, вырезанных из поверхностного слоя заготовок диаметром 100 мм, полученных на установке полунепрерывного литья. Образцы нагревали до температур испытания в печи сопро-

тивления в течение 10 мин. Контроль температуры осуществляли хромель-алюмелевой термопарой, зачеканенной в контрольный образец, расположенный в непосредственной близости от испытываемого, и подсоединенной к прибору Щ4313. Образцы испытывали при четырех скоростях перемещения активного захвата: 0,17, 10, 51 и 107 мм/мин. Для каждой скорости нагружения и температуры (850, 950, 1050 и 1100 °С) испытывали по пять образцов.

Исследование влияния химического состава чугуна на прочность проводили при температуре 950 °С и скорости нагружения 51 мм/мин.

В первой серии экспериментов испытывали образцы постоянного химического состава: С — 3,7%, Si — 1,92, Mn — 0,41, P — 0,079, S — 0,054, Cr — 0,35, Ni — 0,37; Cu — 0,36, Ti — 0,04%, на которых определяли влияние скорости нагружения и температуры на предел прочности чугуна. Зависимость предела прочности чугуна от скорости нагружения при различных температурах испытания приведена на рис. 2. С уменьшением скорости нагружения с 10 до 0,17 мм/мин происходит резкое падение предела прочности, более заметное при меньших температурах.

Известно, что характер кривой напряжение — деформация при испытании металла на разрыв, как и при других способах нагрузки, определяется реализацией процессов деформационного упрочнения, сопровождающегося повышением напряжений и процессов, вызывающих их релаксацию. Если скорость релаксации меньше скорости деформации, имеет место вязкое разрушение металла, в противоположном случае — хрупкое. При испытаниях чугунных образцов в большинстве случаев преобладающим было хрупкое разрушение, что свидетельствует о превалировании деформационного упрочнения на стадии множественного скольжения дислокаций (участок линейного упрочнения на кривых деформационного упрочнения). Выбранные температуры испыта-



Рис. 1. Зависимость предела прочности чугуна от скорости нагружения: 1 — $T = 850$ °С; 2 — 950; 3 — 1050; 4 — 1100 °С

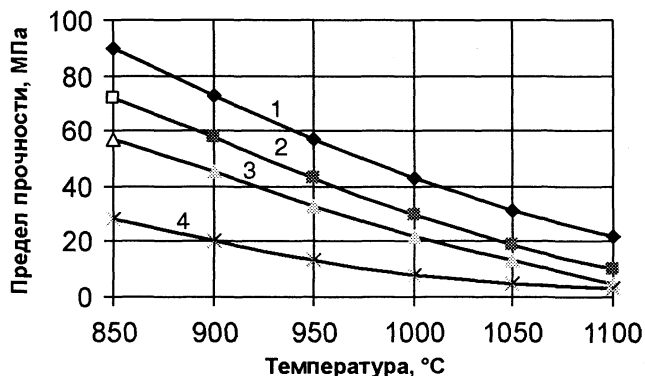


Рис. 2. Зависимость предела прочности чугуна от температуры: 1 — скорость нагружения 107 мм/мин; 2 — 51; 3 — 10; 4 — 0,17 мм/мин

ния соответствуют температурам превращения феррита в аустенит и могут отражать закономерности деформационного упрочнения кристаллов с ГЦК-решеткой.

Анализ экспериментальных данных показывает, что предел прочности чугуна на растяжение зависит не только от температуры, но и от скорости нагружения. Так, при максимальной скорости нагружения 107 мм/мин при повышении температуры от 850 до 110 °С предел прочности на растяжение понижается с 90 до 20 МПа, а при минимальной скорости 0,17 мм/мин — с 30 до 5 МПа. При этом влияние скорости нагружения более существенно при более низких температурах. Высокие температуры повышают подвижность вакансий и дислокаций, силы их взаимодействия, что способствует развитию релаксационных процессов. Внутренние напряжения в этом случае понижаются, снижается чувствительность к изменению скорости нагружения.

Более высокие характеристики предела прочности на растяжение при динамических нагрузках по сравнению со статическими объясняются также тем, что поглощенная энергия воздействия в этом случае больше, а, следовательно, больше и коэффициент упрочнения металла.

Зависимость прочности чугуна от скорости нагружения в пределах 10–107 мм/мин — линейная. Угол наклона кривых свидетельствует о том, что влияние скорости нагружения больше при более низкой температуре. Очевидно, в этом случае роль теплового фактора в релаксации напряжений меньше, чем при более высоких температурах.

Анализ результатов по влиянию температуры и скорости нагружения на предел прочности чугуна показал, что:

1. На предел прочности чугуна оказывают влияние температурный и скоростной факторы. Совместное влияние этих факторов ранее отмечалось в работах [5, 6]. Эта зависимость представляется уравнением для предела текучести:

$$\sigma_y(\dot{\epsilon}, T) = \sigma_0 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^n \exp b \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right),$$

где $\exp(1/T - 1/T_0) = \sigma_y(T)$ — член, учитывающий влияние температуры; $\sigma_0(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0) = \sigma_y(T)$ — член, учитывающий влияние скорости нагружения; σ_0 — статический предел текучести при 20 °С; T_0 — исходная температура; $\dot{\epsilon}_0$ и $\dot{\epsilon}$ — соответственно скорость статического и динамического нагружения; n и b — константы для данного материала.

Полученное уравнение при использовании относительных величин

$$v = \frac{\sigma_y(T)}{\sigma_0}, \quad \xi = \frac{\sigma_y(\dot{\epsilon})}{\sigma_0}, \quad \eta = \frac{\sigma_y(\dot{\epsilon}, T)}{\sigma_0}$$

записывается в виде $\eta = v\xi$ и отражает совместное влияние T и $\dot{\epsilon}$.

2. Характер кривых $\sigma_b = f(\dot{\epsilon})$ и $\sigma_b = f(T)$ определяется степенью реализации упрочняющих и релаксационных процессов. При высоких скоростях нагружения преобладают упрочняющие процессы, инициированные повышением плотности дислокаций, реализацией множественного скольжения, образованием “сидячих” дислокаций за счет взаимодействия дислокаций разных плоскостей скольжения [7]. При малых скоростях нагружения и высоких температурах проявляется вклад релаксационных процессов, при этом распределение напряжений становится более равномерным, возможно формирование ячеистой структуры.

3. Одной из вероятных причин, вызывающих хрупкое разрушение, является возможность возникновения микротрещин на концах графитовых включений.

На сопротивление разрушению сильное влияние оказывают сегрегация примесей к границам зерен, оплавление легкоплавких составляющих, межкристаллитное окисление и т.д. Процессы ускоряются одновременным воздействием температуры и напряжения. По мере уменьшения скорости нагружения тенденция к межзеренному разрушению усиливается, при увеличении скорости ослабление границ зерна меньше сказывается на прочности. При температуре испытания 1100 °С резкого падения прочности не наблюдается.

Во второй серии экспериментов проверяли влияние химического состава на прочность чугуна при температуре 950 °С и скорости нагружения 51 мм/мин. Большинство исследованных образцов имеют точечный или пластинчатый графит, расположенный в междендритных пространствах. Установлено, что содержание основных элементов в исследованных пределах практически не влияет на прочность чугуна. Этот вывод совпадает с литературными данными [1, 2], где утверждается, что, чем выше температура, тем меньше заметно влияние химического состава. Данные о влиянии содержания легирующих элементов на предел прочности на растяжение при температуре 950 °С приведены в таблице.

Анализ результатов показывает незначительное повышение предела прочности чугуна на растяжение с увеличением суммарного содержания хрома и никеля.

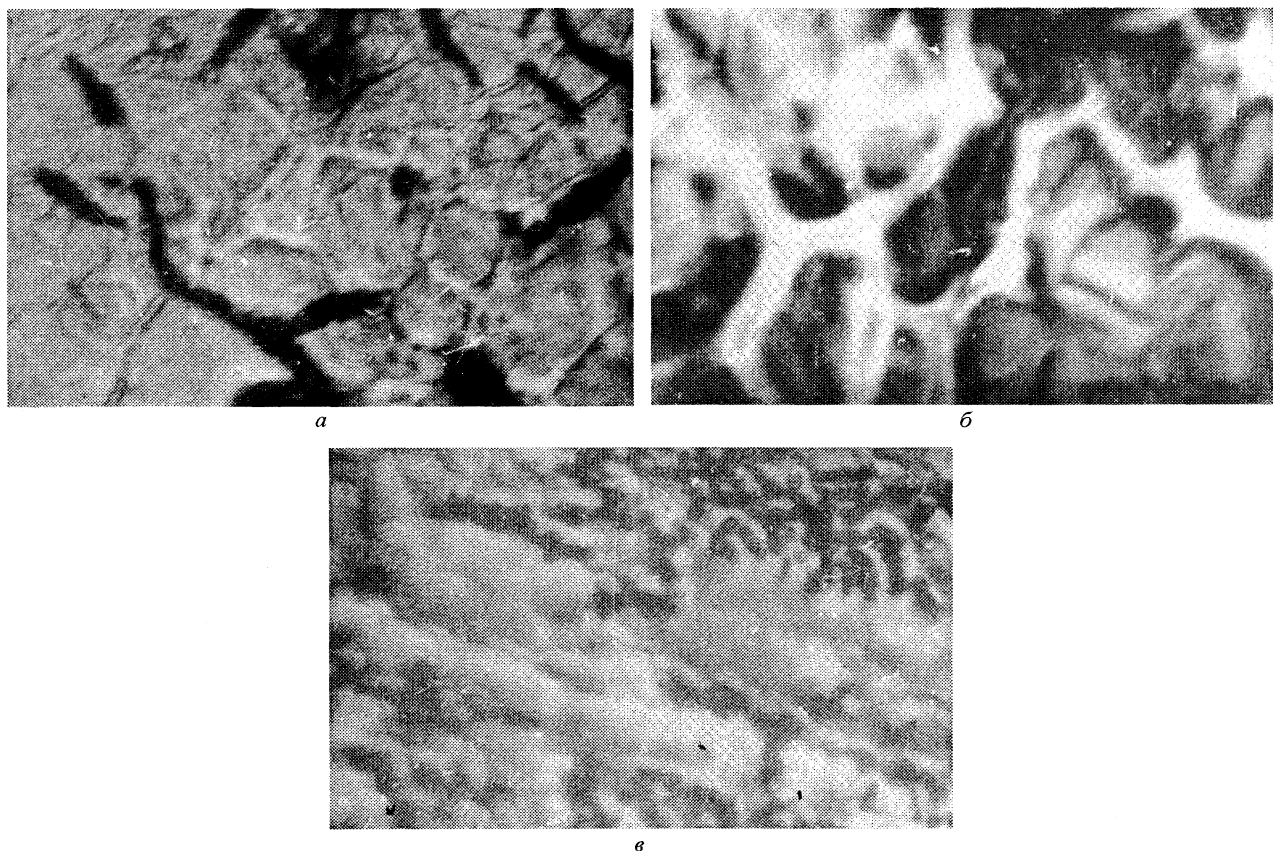


Рис. 6. Увеличение количества фосфидной эвтектики при изменении температуры от 950 до 1050 °С. х200

при температуре 900–950 °С перед расплавлением фосфидной эвтектики происходит растрескивание матрицы преимущественно по границам зерен. Возможной причиной снижения прочности является действие фосфора как поверхностно-активного вещества (эффект Ребиндера), а также вследствие расплавления — увеличения в объеме фосфидной эвтектики и перераспределения ее по границам зерен.

Полученные экспериментальные данные позволяют разработать научно обоснованные оптимальные технологические параметры процесса непрерывного литья машиностроительных заготовок из чугуна.

Литература

1. Гиршович Н.Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. М.: Машиностроение, 1966.
2. Пивоварский Е. Высококачественный чугун. М.: Metallurgy, 1965.
3. Жуков А.А. Материалы в машиностроении. Т. 4. М.: Машиностроение, 1969.
4. Umeda Takateru et. al. Механические свойства чугуна при высоких температурах // Imono J. Jap. Foundrymen's Soc. 1982. Vol. 54. N3. P. 173–179.
5. Витман Ф.Ф., Златин Н.А., Иоффе С.С. // Журн. техн. физики. 1949. Т. 19.
6. Волошенко-Климовицкий Ю.Я. // Изв. АН СССР ОТН. Механика и машиностроение. 1962. №4.
7. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: Metallurgy, 1978.
8. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. М.: Машиностроение, 1974. Т.2.