

В. В. Ясюков, канд. техн. наук, приват-профессор

Т. В. Лысенко, д-р техн. наук, профессор

Е. А. Пархоменко, аспирант, e-mail: elena041793@gmail.com

Одесский национальный политехнический университет, Одесса

Газы и неметаллические включения в стальных отливках

Неметаллические включения и газы в значительной степени определяют комплекс свойств отливок. В зависимости от характера и природы включений – экзо- или эндогенных, степени чистоты сплавов и их газосодержания, механические свойства отливок существенно изменяются. Изучены факторы, которые влияют на форму, размеры, расположение, количество включений, их связь с характеристиками прочности и пластическими характеристиками стального литья.

Ключевые слова: экзогенные и эндогенные неметаллические включения, механические свойства отливок, газы в металле.

Актуальность работы. Производственные мощности литейщиков Украины на сегодняшний день составляют 1 197 250 т. Анализ 185 литейных цехов, проведенный авторами статьи, показывает, что на долю стального литья приходится 620 372 т (51,8 %), чугунного литья – 516 230 т (43,1 %), цветного литья – 60 648 т (5,1 %). Более высокий удельный вес производства стальных отливок является следствием наличия в стране предприятий тяжелого, транспортного, горного, нефтяного машиностроения. Детали для этих предприятий традиционно изготавливались из конструкционных и легированных в разной степени сталей.

Повышенные требования к эксплуатационной надежности литых деталей привели к совершенствованию металлургических процессов выплавки стали. Одним из наиболее важных направлений является изучение влияния неметаллических включений на механические свойства сталей и внедрение их в производство.

Общепринятая теория и общепризнанная практика ведения плавки в электропечах при производстве спокойной стали для отливок заключается в раскислении марганцем, кремнием и алюминием. Этим достигается снижение содержания вредных примесей и благоприятные изменения природы и формы неметаллических включений (сульфиды, силикаты, оксиды, нитриды). Поэтому одной из основных характеристик сплавов являются неметаллические включения и газы, в значительной степени определяющих комплекс свойств отливок. В зависимости от характера и природы включений – экзо- или эндогенных, степени чистоты сплавов и их газосодержания, свойства отливок существенно изменяются. Авторы [1] приводят данные по изменению механических свойств стальных отливок в зависимости от количества включений: для стали 10Л, например, при конечном раскислении от 0,02 % Al до 0,1 % Al, количество неметаллических включений (НВ) изменяется от $3,59 \cdot 10^{-3}$ до $1,86 \cdot 10^{-3}$ (оценка методом «Л» ГОСТ 1778-70); изменяются как топография НВ, так и их виды. Увеличивается КСУ от

0,34 до 1,10 МДж/м². Для отливок из стали 35Л также наблюдается рост прочностных и пластических характеристик: при снижении количества НВ более, чем в 2 раза: σ_b растет от 346 до 359 МПа; δ – от 22 до 30 %, КСУ – от 1,12 до 1,15 МДж/м². Литые феррито-аустенитные стали типа Х18Н9Т, 20Х23Н13ТЛ также чувствительны к неметаллическим включениям, которые оказывают влияние на прочность и пластичность сплава.

Газы в металле могут находиться в виде газовых раковин или пористости, дефектов, проявляющихся в изломе (флокены и др.), неметаллических включений. Все эти дефекты приводят к понижению механических свойств. При исследовании влияния, например, азота на формирование неметаллических включений и изменение механических свойств показано [1], что при суммарном [N (0,006 %) + S (0,017 %)], равном 0,023 %, количество НВ составляет 0,01219 % по объему и состоит из оксидов неправильной формы, сульфидов, оксисульфидов, оксидов глобулярных и нитридов титана. При этом σ_b – 681,1 МПа, σ_t – 379,7 МПа, δ – 28,4 %, ψ – 63,2 %, КСУ – 1,3 МДж/м². При увеличении [N (0,045 %) + S (0,048 %)], равном 0,093 %, количество НВ составляет 0,23149 % по объему. Механические свойства заметно снижаются: σ_b – 556,4 МПа, σ_t – 330,2 МПа, δ – 12,3 %, ψ – 13,1 %, КСУ – 0,23 МДж/м².

Сказанное выше подтверждает необходимость расширения исследований в области изучения неметаллических включений и газов и их влияния на свойства литья, поскольку сложные процессы взаимодействия газов с металлом отливки изучены недостаточно, а меры, применяемые для борьбы с этими дефектами, далеко не всегда сопровождаются успехом.

Постановка задачи. Системное изучение физико-химических основ металлургии стали началось в начале XX века после выхода в свет книги В. Е. Грум-Гржимайло «Производство стали». Несомненным является факт, что литейщики быстро перенимали теоретические и практические достижения «большой» металлургии применительно к сталелитейным цехам.

В последующие десятилетия были созданы научные школы, позволяющие совершенствовать металлургические процессы в области раскисления стали, удаления неметаллических включений, внепечной обработки. Все эти направления позволили определить современный уровень металлургии стали, направленный на повышение физико-механических свойств отливок. Издание монографий [1, 2], учебников [3, 4], проведение конференций по исследованиям в области изучения неметаллических включений и газов и их влияния на свойства литья, показывают важность развития данной тематики для повышения эксплуатационной надежности литых деталей. Эта проблема неоднократно освещалась на международных конгрессах литейщиков. Однако в широко известной монографии [5] автор, тщательно детализируя пороки стальных отливок, в классе № 300 дает наименование и отличительные признаки группы № 310 (газовые раковины) и не упоминает эндогенные включения, хотя эти дефекты органично связаны между собой. Там же в группе № 330 даются включения шлака, окислов металлов, формовочных или других материалов, то есть экзогенные включения. И все это при том, что монография, являясь настольной книгой поколения литейщиков страны, увидела свет в 1974 году, то есть на 4 года позже стандарта ГОСТ 1778-70 «Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений» [6], где был узаконен метод Л, применяемый для испытания литья. Авторы книг [7, 8] также описывают явления, связанные с газами в металлах без связи с тем, что газы являются источниками формирования эндогенных НВ. Устранение такого рода разночтений в понимании проблемы может служить фундаментом для дальнейшего интенсивного развития литейного производства. Поэтому целью работы является обобщение результатов исследования процессов формирования неметаллических включений, а также меры, способствующие управлению степенью чистоты сплавов и получению отливок с заданными свойствами.

Сущность и методы исследования.

А. Эндогенные включения.

Одной из главных проблем в литейном производстве является использование устаревших нормативных документов. В этих документах, а, как правило, это государственные стандарты, содержание вредных примесей в сталях не соответствует нынешним требованиям к стальному литью. Так, например, содержание серы и фосфора в конструкционных нелегированных сталях определяется ГОСТ 977-88 и колеблется для серы в пределах 0,050 – 0,045 % для плавки на основной футеровке и 0,060 – 0,050 % для плавки на кислой футеровке. Для фосфора эти параметры лежат в пределах 0,050 – 0,040 % для плавки на основной футеровке и 0,060 – 0,050 % для плавки на кислой футеровке. Для сравнения: низкоуглеродистые стали (0,13 – 0,18 % С) по стандарту ASTM A 131 (США) содержат серу от 0,026 до 0,032 %; среднеуглеродистые стали (0,53 – 0,55 % С) по стандарту ASTM B5E содержат серу от 0,008 до 0,011 %. Стандарт SAE 1006 (США) регламентирует содержание серы 0,013 – 0,015 %. По фосфору показатели для

этих стандартов колеблются от 0,004 до 0,025 %. Таким образом, необходимо пересматривать наши стандарты (ДСТУ) в сторону уменьшения содержания вредных примесей. Требуется также и пересмотр сроков действия стандартов, некоторые из них истекли в конце прошлого века. Кадровый потенциал для решения этих задач есть: это подразделения НАНУ, ВУЗы, производственные коллективы разных форм собственности. В настоящее время реформа высшего образования предусматривает три уровня образования: бакалавр – магистр – доктор философии. С целью решения этой задачи изменяются учебные планы специальностей 136 «Металлургия» и 132 «Материаловедение»; соответственно пересматриваются рабочие учебные программы дисциплин, в которых необходимо более детально анализировать причины формирования неметаллических включений и меры борьбы с ними.

В настоящее время подробно изучены вопросы идентификации неметаллических включений, основанные на металлографическом исследовании нетравленных шлифов в отраженном свете; включения классифицированы на оксиды, силикаты, сульфиды, нитриды. Основное внимание при их исследовании уделено зависимости свойств стали от количества, формы, размера и характера распределения НВ. Это подтверждается большим количеством публикаций [9, 10, 11] и докладов по данной тематике. При изучении влияния НВ на свойства стали кроме металлографического находит применение петрографический метод анализа [1], который позволяет изучать фазовый состав и морфологию включений. Для освоения этого метода необходимо наличие комплекса исследовательского оборудования и приборов, позволяющих изучать локальное выделение включений из металла и определять их природу.

Основным препятствием получения чистой по НВ стали является неполнота удаления включений, возникающих после раскисления стали. Всплывание неметаллических частиц в жидком металле происходит под действием силы:

$$f = \frac{4}{3} \pi r^3 (\gamma_m - \gamma_{шл}), \quad (1)$$

где r – радиус частицы; $\gamma_m - \gamma_{шл}$ – удельный вес металла и шлака (неметаллических включений).

Сопротивление среды движению малых сферических частиц определяется законом Стокса:

$$S = 6\pi r v \frac{\eta}{g}, \quad (2)$$

где v – скорость всплывания; η – динамическая вязкость металла; g – ускорение силы тяжести.

Определяя скорость всплывания из условия $S = f$, имеем:

$$v = \frac{2g}{9\eta} r^2 (\gamma_m - \gamma_{шл}). \quad (3)$$

Закон Стокса удовлетворительно описывает удаление сравнительно крупных включений сферической формы в спокойной ванне. Такие включения (10 – 20 мкм и более) в этих условиях всплывают в металлической среде и довольно быстро удаляются из металла. Поэтому важно, чтобы включение при температуре сталеварения находилось в жидком состоянии. Что касается мелких включений, то их укрупнение происходит медленно и конвективные потоки сводят на нет действие закона Стокса [12]. Перенос мелких включений на границу металл – шлак осуществляется, в основном, движущейся жидкостью и увеличивается при интенсификации перемешивания металла. Конвекция способствует укрупнению включений за счет увеличения частоты столкновения частиц друг с другом. При всплывании частицы к межфазной поверхности начинается переход границы раздела металл – шлак. Здесь решающим является смачивание: включения, плохо смачиваемые сталью (Al_2O_3 , ZrO_2), переходят в шлак и ассимилируются шлаковой фазой. Включения, хорошо смачиваемые (FeO , MnO , SiO_2), переходят межфазную поверхность с трудом, поэтому накапливаются на границе раздела с вероятностью возврата их в металл. Таким образом, размер включений определяет механизм доставки к поверхности раздела металл – шлак, а преодоление этого барьера зависит от поверхностных явлений и, прежде всего, смачивания. Интенсификации процесса удаления неметаллических включений способствует активное кипение ванны, при котором пузырьки CO увлекают за собой включения и выносят их в шлак. При отсутствии кипения (низкое содержание углерода) ванну продувают инертным газом, действие которого аналогично пузырькам CO .

С целью обеспечения низкого содержания кислорода, благоприятной формы и расположения неметаллических включений, для получения металла с высокими прочностными и пластическими свойствами следует интенсифицировать различные формы окислительного периода и процесс раскисления в сочетании раскислительной способности ферросплавов с одновременным полным усвоением жидким металлом алюминия. Одновременно нужно вести доводку шлака по увеличению в нем CaO до 18 – 30 %, что делает шлак жидкоподвижным, активным, а в металле значительно снижается содержание кислорода. Износостойкость футеровки при этом не изменяется [13]. Раскисление стали проводится ферросилицием, ферромарганцем, алюминием. Особое внимание уделяется степени усвоения металлом алюминия. Содержание кислорода в металле низкое (до 0,002 – 0,005 %), неметаллические включения приобретают благоприятную форму. Механические свойства стали 35Л после термообработки: σ_b – 570-580 МПа, σ_T – 300-330 МПа, δ – 27-33 %, ψ – 45 %, то есть выше требований стандарта.

Как указывалось выше, газы в стали (водород, азот, кислород) могут присутствовать в различных формах: несплошностях (газовые раковины); находиться в α – твердом растворе; образовывать различные соединения в виде неметаллических включений. При наличии в стали водорода более

0,0004 – 0,0006 %мас. в отливках из хромистых, хромоникелевых, хромоникельвольфрамовых, хромомарганцовистых сталей могут возникать трещины (флокены). Чем более высокую прочность имеет сталь, тем опасней этот дефект. По данным [14], флокены образуются при быстром охлаждении в интервале температур 200 – 20 °С. Это происходит вследствие выделения водорода из раствора при температурах ниже 200 °С с созданием сильных внутренних напряжений, которые и приводят к образованию флокенов.

Образованные азотом и кислородом оксиды и нитриды охрупчивают металл и ухудшают его свойства. Растворимость азота (0,007 – 0,010 %мас.) и кислорода (0,002 – 0,004 %мас.) в α – железе невелика, но она резко уменьшается с понижением температуры с образованием пересыщенного α – твердого раствора. В процессе эксплуатации отливок это приводит к сильному охрупчиванию вследствие процессов старения («деформационное старение»). Проявляется оно в уменьшении запаса вязкости и в повышении порога хладноломкости, что недопустимо для таких видов литья, как вагонное. Как правило, содержание указанных примесей невелико и их влияние на многие другие свойства незаметно. Аналогичное влияние на повышение порога хладноломкости оказывают и примеси цветных металлов (Cu , Pb , Zn , Sb , Sn и др.). Повышают порог хладноломкости различные примеси по-разному; 0,01 %мас. каждой примеси дает приращение: кислород + 15 °С; азот + 10 °С; углерод + 2 °С; фосфор + 7 °С; медь + 1 °С; олово + 30 °С; цинк + 7 °С; висмут + 25 °С; сурьма + 20 °С [15].

Действенным средством уменьшения неметаллических включений и вышеуказанных элементов является вакуумирование металла. В условиях вакуума вследствие значительного снижения температур кипения из жидкого металла активно испаряются Mn , Cu , Al , Bi и др., что способствует повышению чистоты металла с одновременным повышением пластичности стали.

Общеизвестным является факт, что принятый метод конечного раскисления алюминием приводит к образованию дезориентированных остроугольных включений. При малом содержании серы они относительно безвредны [4], при повышении содержания серы они оказывают заметное влияние, как концентраторы напряжений. Поэтому при содержании серы более 0,01 – 0,015 % рекомендуется дополнительное модифицирование стали редкоземельными (РЗМ) или щелочноземельными (ЩЗМ) металлами. При этом остроугольные оксисульфидные включения переводятся в округлые. Широко применяется силикокальций, существенно улучшающий свойства стали. Перспективен барий, как глобуляризатор, физико-химические свойства которого близки к кальцию. Характерной особенностью редкоземельных металлов (РЗМ) является их высокое химическое сродство к кислороду, сере, азоту, цветным металлам. Влияние РЗМ проявляется как в снижении содержания этих примесей в стали, так и в переводе их из активных форм в пассивные, это способствует очищению границ зерен.

Представляет интерес применение для окончательного раскисления стали в ковше ввод алюминиокальциевой проволоки. Этот метод следует рассматривать, как внепечную обработку, что позволяет убрать алюминиевые кольца со стопора и нагревать ковши перед выпуском. Нагрев ковша способствует снижению температуры перегрева, что положительно влияет на усадочные процессы в отливке, газонасыщенность стали и экономию электроэнергии. Ввод алюминиокальциевой проволоки способствует перемешиванию металла в ковше с усреднением его по температуре и химсоставу.

Перечисленные выше мероприятия по уменьшению влияния неметаллических включений на качество стального литья не являются исчерпывающими. Для каждого мероприятия в конкретном сталелитейном цехе, с учетом особенностей производства, должны быть разработаны технологические решения, обеспечивающие их выполнение и достижение поставленной цели.

Б. Экзогенные включения.

Экзогенные включения, как правило, приводят к неисправимому браку отливок за счет образования песчаных раковин. Одной из причин возникновения этого вида брака является нарушение сплошности поверхностного слоя формы. При отделении моделей наблюдается прилипание формовочной смеси и разрушение поверхности формы за счет адгезии, обусловленной межмолекулярным взаимодействием. Кроме того, высокая степень уплотнения формовочных смесей, свойственная динамическим методам формообразования, приводит к трещинам поверхностного слоя формы за счет упругих свойств смеси [16]. Разупрочненная поверхность формы размывается жидким металлом с образованием экзогенных включений. Для изучения этих явлений предложена методика [17], моделирующая отделение моделей при нормальном и тангенциальном направлениях внешнего воздействия. Исследовались формовочные смеси с различными связующими: глиной, бентонитом, жидким стеклом, органическими связующими. В качестве материалов моделей применяли древесину (сосна, бук), чугун, сталь, алюминиевый сплав, бронзу, эпоксидные композиции. Для изменения адгезионных сил использовали модельные лаки, припылы, жидкие разделительные составы. Получены и проанализированы количественные зависимости прилипаемости от технологических факторов: влажности, степени уплотнения, прочности, температуры формовочных и стержневых смесей, шероховатости поверхности моделей.

Затрудненное отделение моделей при высокой степени уплотнения объясняется преимущественно резко возрастающей зажимающей силой, зависящей от конфигурации моделей. Для изучения этого явления использовали модели различной геометрической

формы: квадраты, конусы, кольцевые модели с карманами разной глубины и др. Причиной частичного разрушения формы является, в основном, отрыв части сырого болвана при извлечении модели (факторы регулировки формовочного оборудования не учитывались). По результатам исследований были определены допустимые соотношения высоты болвана к его диаметру для различных степеней уплотнения, при которых местные разрушения формы сведены к минимуму. Предложены допустимые величины формовочных уклонов для моделей различной конфигурации.

Кардинальным методом снижения количества экзогенных включений является применение двухслойных литейных форм – керамизированных форм, основой которых является жидкостекольная смесь, облицованная холодноогеливаемой керамикой на основе гидролизованного раствора этилсиликата [18]. Такая комбинация, несмотря на некоторое усложнение технологии, позволяет получить высокое качество литых поверхностей, повысить геометрическую точность и эксплуатационную надежность отливок.

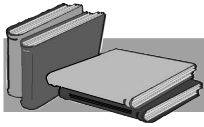
Одной из перспективных инновационных технологических разработок, направленных на повышение качества отливок, является литье в низкотемпературные формы (НТФ) [19].

Литье в НТФ связано с существенным повышением прочности литейных форм в 5 – 10 раз в сравнении с разовыми песчаными формами [20]. Это позволяет значительно снизить количество экзогенных включений в отливках.

Выводы

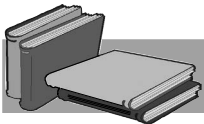
Неметаллические включения и газы оказывают существенное влияние на механические свойства отливок. Особенно это проявляется в снижении пластических характеристик (δ , ψ , КСЧ) и повышении порога хладноломкости. Решение этой важной задачи может быть достигнуто при разработке и внедрении нормативно-технической документации, ужесточающей содержание вредных примесей в сплавах, подготовке квалифицированных специалистов-литейщиков с необходимым уровнем компетентности; освоении петрографического метода анализа фазового состава и морфологии включений; внедрении мероприятий по очистке сплавов от включений после рафинирования; интенсификации различных форм окислительного периода при плавке; борьбе с газами как в расплаве, так и в литейной форме; внедрению новых форм модифицирования и окончательного раскисления; внепечной обработке расплава.

Кардинальным методом снижения количества экзогенных включений в стальных отливках следует считать применение керамизированных форм, а также литье в низкотемпературные формы.



ЛИТЕРАТУРА

1. Лунев В. В., Пирожкова В. П., Грищенко С. Г. Неметаллические включения в сталях, чугунах и ферросплавах. – Запорожье: Днепропетровский металлург, 2006. – 383 с.
2. Шульте Ю. А. Электрометаллургия стального литья. – М.: Metallurgia, 1970. – 223 с.
3. Нехендзи Ю. А. Стальное литье. – М.: Metallurgizdat, 1948. – 776 с.
4. Шульте Ю. А. Производство отливок из стали. – Киев-Донецк: Вища школа, 1983. – 184 с.
5. Василевский Л. Ф. Технология стального литья. – М.: Машиностроение, 1974. – 408 с.
6. ГОСТ 1778-70. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. – Москва, 1970.
7. Куманин И. Б. Вопросы теории литейных процессов. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
8. Рыжиков А. А. Теоретические основы литейного производства. – М.: Машгиз, 1961. – 447 с.
9. Неметаллические включения и газы в литейных сплавах. Тезисы докладов третьей республиканской научно-технической конференции. – Запорожье, 1982. – 147 с.
10. Колокольцев В. М., Коток А. П., Долбилов К. А. Проблема серы в литейных сталях // Вестник МГТУ им. Т. И. Носова. – 2014. – № 3. – С. 30–32.
11. Влияние серы на качество поверхности заготовки из низкокремнистой стали / Смирнов А. Н. и др. // Металл и литье Украины. – 2009. – № 1. – С. 46–48.
12. Теоретические основы литейной технологии / Ветишка А. и др. – Киев: Вища школа, 1981. – 320 с.
13. Влияние процесса плавки под шлаком с высоким содержанием окиси кальция на газонасыщенность и механические свойства кислой углеродистой электростали / Фролов С. Ф. и др. // «Газы в литом металле», 1964. – С. 66–69.
14. Гудремон Э. Специальные стали. – М.: Metallurgizdat, 1959. – 952 с.
15. Гуляев А. П. Металловедение. – М.: Metallurgia, 1986. – 170 с.
16. Аксенов П. Н. Оборудование литейных цехов. – М.: Машиностроение, 1977. – 510 с.
17. Лысенко Т. В., Ясюков В. В., Капацिला Т. И. Экзогенные включения в отливках // Неметалеві включення і газу у ливарних сплавах. Збірник матеріалів V Міжнародної науково-технічної конференції. – Запоріжжя, 2009. – С. 51–52.
18. Ясюков В. В., Буланова А. В. Развитие методов керамизации разовых песчаных форм. Материалы XII Международной научно-практической конференции. – Запорожье, 2016. – С. 255–257.
19. Шинский О. И., Лысенко Т. В., Прокопович И. В., Замятин Н. И., Солоненко Л. И. Низкотемпературные литейные формы. – Одесса, 2017. – 248 с.
20. Шинский О. И., Лысенко Т. В., Солоненко Л. И. Влияние состава, дисперсности и температуры охлаждения формовочных материалов на прочностные свойства низкотемпературных форм // Металл и литье Украины. – 2016. – № 11–12. – С. 47–51.



REFERENCES

1. Lunev V. V., Pirozhkova V. P., Grishchenko S. G. (2006). Nemetallicheskie vklucheniia v staliakh, chugunakh i ferrosplavakh [Non-metallic inclusions in steels, cast iron and ferroalloys]. Zaporozh'e: Dnepropetrovskii metallurg, 383 p. [in Russian].
2. Shul'te Yu. A. (1970). Elektrometallurgiiia stal'nogo lit'ia [Electrometallurgy of steel casting]. Moscow: Metallurgiiia, 223 p. [in Russian].
3. Nekhendzi Yu. A. (1948). Stal'noe lit'e [Steel castings]. Moscow: Metallurgizdat, 776 p. [in Russian].
4. Shul'te Yu. A. (1983). Proizvodstvo otlivok iz stali [Manufacture of castings from steel]. Kiev-Donetsk: Vyshcha shkola, 184 p. [in Russian].
5. Vasilevskii L. F. (1974). Tekhnologiiia stal'nogo lit'ia [Technology of steel casting]. Moscow: Mashinostroenie, 408 p. [in Russian].
6. GOST 1778-70. Stal'. Metallograficheskie metody opredeleniia nemetallicheskih vkluchenii [Metallographic methods for determining nonmetallic inclusions]. Moscow, 1970 [in Russian].
7. Kumanin I. B. (1976). Voprosy teorii liteinykh protsessov [Questions of the theory of foundry processes]. Moscow: Mashinostroenie, 216 p. [in Russian].
8. Ryzhikov A. A. (1961). Teoreticheskie osnovy liteinogo proizvodstva [Theoretical foundations of foundry]. Moscow: Mashgiz, 447 p. [in Russian].
9. Nemetallicheskie vklucheniia i gazy v liteinykh splavakh. Tezisy dokladov tret'ei respublikanskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [Non-metallic inclusions and gases in cast alloys. Theses of the reports of the third republican scientific and technical conference]. Zaporozh'e, 1982, 147 p. [in Russian].
10. Kolokol'tsev V. M., Kotok A. P., Dolbilov K. A. (2014). Problema sery v liteinykh staliakh [The problem of sulfur in foundry steels]. Vestnik MGTU im. T. I. Nosova, no. 3, pp. 30–32 [in Russian].
11. Smirnov A. N. et al. (2009). Vliianie sery na kachestvo poverkhnosti zagotovki iz nizkokremnistoi stali [Effect of sulfur on the quality of the surface of the billet from low-silicon steel]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 1, pp. 46–48 [in Russian].
12. Vetishka A. et al. (1981). Teoreticheskie osnovy liteinoi tekhnologii [Theoretical foundations of foundry technology]. Kiev: Vyshcha shkola, 320 p. [in Russian].

13. Frolov S. F. et al. (1964). Vliianie protsessa plavki pod shlakom s vysokim sodержaniem okisi kal'tsiia na gazonasyschennost' i mekhanicheskie svoistva kisloi uglirodistoї elektrostali [*Influence of the melting process under the slag with a high content of calcium oxide on the gas saturation and mechanical properties of acidic carbon steel*]. Gazy v litom metalle, pp. 66–69 [in Russian].
14. Gudremon E. (1959). Spetsial'nye stali [*Special steels*]. Moscow: Metallurgizdat, 952 p. [in Russian].
15. Guliaev A. P. (1986). Metallovedenie [*Metallurgy*]. Moscow: Metallurgii, 170 p. [in Russian].
16. Aksenov P. N. (1977). Oborudovanie liteinykh tsekhov [*Foundry equipment*]. Moscow: Mashinostroenie, 510 p. [in Russian].
17. Lysenko T. V., Yasiukov V. V., Kapatsila T. I. (2009). Ekzogenne vklucheniia v otlivkakh [*Exogenous inclusions in castings*]. Nemetalevi vkluchennia i gazy u lyvarnykh splavakh. Zbirnyk materialiv V Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii. Zaporizhzhia, pp. 51–52 [in Russian].
18. Yasiukov V. V., Bulanova A. V. (2016). Razvitie metodov keramizatsii razovykh peschanykh form [*The development of methods for the ceramics of single sand molds*]. Materialy XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Zaporozh'e, pp. 255–257 [in Russian].
19. Shinskii O. I., Lysenko T. V., Prokopovich I. V., Zamiatin N. I., Solonenko L. I. (2017). Nizkotemperaturnye liteinye formy [*Low temperature casting molds*]. Odessa, 248 p. [in Russian].
20. Shinskii O. I., Lysenko T. V., Solonenko L. I. (2016). Vliianie sostava, dispersnosti i temperatury okhlazhdeniia formovochnykh materialov na prochnostnye svoistva nizkotemperaturnykh form [*The influence of composition, dispersity and temperature of cooling mold materials on the mechanical properties of low-temperature forms*]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 11–12, pp. 47–51 [in Russian].

Анотація

Ясюков В. В., Лисенко Т. В., Пархоменко О. О.

Газы та неметалеві включення в сталевих виливках

Неметалеві включення та газы в значній мірі визначають комплекс властивостей виливків. В залежності від характеру та природи включень – екзо- або ендогенних, ступеня чистоти сплавів та їх газозмісту, механічні властивості виливків істотно змінюються. Вивчено фактори, що впливають на форму, розміри, розташування, кількість включень, їх зв'язок з характеристиками міцності та пластичними характеристиками сталевого лиття.

Ключові слова

Екзогенні та ендогенні неметалеві включення, механічні властивості виливків, газы в металі.

Summary

Yasiukov V., Lysenko T., Parkhomenko E.

Gases and non-metallic inclusions in steel castings

Nonmetallic inclusions and gases largely determine the complex properties of castings. Depending on the character and nature of the inclusions – exo- or endogenous, the purity of alloys and their gas content, the mechanical properties of the castings change significantly. Factors that influence the shape, size, location, number of inclusions, their relation to the strength characteristics and plastic characteristics of steel casting are studied.

Keywords

Exogenous and endogenous nonmetallic inclusions, mechanical properties of castings, gases in metals.

Поступила 06.10.17