

В. В. Ясюков, Т. В. Лысенко, Л. И. Солоненко, В. А. Чередник*

Одесский национальный политехнический университет, Одесса

*ПАО «Одесский машиностроительный завод «Красная Гвардия», Одесса

Анализ и синтез физико-химического воздействия на эксплуатационную надежность отливок

Показано влияние горячих трещин на эксплуатационную надежность литых деталей. Проанализирована природа возникновения этого дефекта. Предложена инновационная технология повышения качества литья за счет получения композиционных отливок с использованием пенополистироловых моделей.

Ключевые слова: горячие трещины, доперлитная усадка сплава, податливость форм и стержней, пенополистироловые модели, объемное армирование композиционных отливок.

Актуальность работы. Одним из наиболее опасных пороков стальных отливок являются горячие трещины. Нередко они проявляются на габаритных разнотолщинных тонкостенных отливках сложной геометрии, а также крупных толстостенных, отливаемых из сталей с низким содержанием углерода, которые претерпевают перитектические превращения в процессе кристаллизации. Примером таких отливок являются детали вагонного литья (рис.1.) (боковые рамы, надрессорные балки, детали автосцепок и др.).

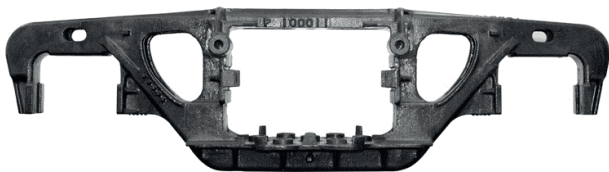


Рис. 1. Боковая рама грузового вагона

В процессе эксплуатации эти детали работают в области переменных циклических и динамических нагрузок; изотропный литой материал обладает повышенной сопротивляемостью разрушениям при разновекторном объемном нагружении благодаря геометрии отливок с развитыми внутренними полостями. Однако отливки могут иметь заметные исходные дефекты в виде раковин, микропор, горячих трещин. Такие неоднородности являются концентраторами напряжений, которые, в конечном итоге, приводят к разрушению деталей и авариям на железной дороге. Практика промышленных предприятий, производящих вагонное литье, (ПО «Уралвагонзавод», ЗАО «АзовЭлектроСталь», ОАО «Кременчугский сталелитейный завод», ОАО «Промтрактор – Промлит» и др.) показывает, что проблема с вагонным литьем, несмотря на применение на предприятиях современных технологических процессов и использование прогрессивного оборудования, а также проведение комплекса мероприятий по повышению качества, не дает желаемого результата.

Постановка задачи. Исследования по изучению факторов, оказывающих влияние на образование горячих трещин, начали проводить в 30-е годы прошлого столетия. В них определялись качественные характеристики и температурные интервалы формирования трещин [1]. В последующие десятилетия, одновременно с повышением требований к эксплуатационной надежности отливок, появилось большое количество работ по данной теме – учебников, монографий, тематических публикаций в периодических изданиях, описывающих практические результаты при конкретном анализе, учитывающем технологию литья, конструкцию отливки, свойства сплава [2-9 и др.]. Далеко не всегда эти научно-практические материалы из-за большого разнообразия литейных технологий, конструкций отливок, массы и габаритов, химического состава сплавов и других параметров носили обоснованный научный характер. Так, например, много дискуссий вызывала температура образования горячих трещин, которая колебалась от 600 до 1250-1450 °С (температура солидуса отливок из углеродистой стали с различным содержанием углерода). Имелись разночтения в объяснении механизма образования горячих трещин с точки зрения заданных условий деформирования, учитывающих конфигурацию отливки, температуру, и изменяющихся с охлаждением отливки.

Анализ склонности к образованию горячих трещин в сплавах и отливках (этот термин различные авторы [2, 3] называют красноломкостью или горячеломкостью) также показывает различные подходы, оправданные конкретными условиями, в которых проводились исследования. Большое число работ позволило выяснить природу образования горячих трещин, пути их устранения, однако надежно получить стальные отливки сложной геометрии без трещин практически затруднительно. Причиной тому является многообразие факторов, влияющих на образование трещин, и учитываемых при их изучении, в том числе, при создании физической и математической модели [10, 11]. Среди них основными являются:

– повышенная доперлитная усадка низкоуглеродистых сталей. При охлаждении стали на линии HJB диаграммы Fe-Fe₃C происходит перитектическая

реакция: переход $\delta \rightarrow \gamma$, сопровождающийся резким уменьшением объема стали (до 1%). Этот фактор, суммируясь с усадкой затвердевания, создает благоприятные условия для развития горячих трещин;

– усадочные раковины (особенно рассредоточенные) являются концентраторами напряжений, как правило, в непосредственной близости от них располагаются трещины. Аналогичное влияние на формирование горячих трещин оказывают газовые раковины и неметаллические включения, ослабляющие сечение отливки;

– ликвационные явления, свойственные стальным отливкам, способствуют образованию горячих трещин, так как понижают прочность металла. Особенно заметна дендритная и зональная ликвация серы, вызывающая анизотропию механических свойств стали;

– стали с более широким интервалом кристаллизации склонны к интенсивному образованию дендритов, облегчающих зарождение горячих трещин;

– химический состав стали оказывает большое влияние на усадку стали, а, следовательно, на образование трещин. Так, увеличение содержания углерода с 0,08 до 0,9% изменяет доперлитную усадку $\epsilon_{\text{дп}}$ от 1,42 до 1,21%; при содержании углерода, соответствующему точке J диаграммы Fe-Fe₃C, $\epsilon_{\text{дп}}$ составляет 1,52% [2]. Легирующие элементы – хром, марганец, молибден, никель, ванадий и др. повышают доперлитную усадку.

Изложенные выше факторы, связанные со свойствами стали, не являются исчерпывающими. Также следует отметить, что они носят ограниченный характер и далеко не всегда дают желаемый результат. Поэтому большое внимание необходимо уделять мероприятиям при разработке технологии формы. К основным из них нужно отнести:

– повышение податливости форм и стержней: формовка по сырому вместо использования сухих форм; замена связующих материалов формовочных смесей, например, силиката натрия на бентонитовые или каолиновые глины. Бентонитовые глины более предпочтительны, так как кристаллы монтмориллонита $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + n\text{H}_2\text{O}$ удерживают влагу на поверхности и впитывают воду внутрь кристаллической решетки, что дает большее набухание. Сюда же можно отнести формирование в стержнях полостей с более податливыми материалами;

– изготовление оболочковых литейных форм из кварцевых или циркониевых песков и искусственных терморезистивных смол с различными добавками. Эти формы значительно более податливы, чем объемные песчано-глинистые. Так, например, при исследовании изменения прочности оболочковой формы при высоких температурах установлено [12], что прочность оболочки на пульвербакелите при температуре 750-800 °C близка к нулю;

– проработка конструктивных параметров отливок с учетом плавных переходов толщин стенок, создания условий для направленного затвердевания, ухода от крестообразных узлов, уменьшения массы тепловых узлов и др.;

– увеличение скорости охлаждения тепловых узлов за счет холодильников либо смесей с высокой теплоаккумулирующей способностью;

– максимально возможное уменьшение неравномерности температурного поля отливки;

– литниковая система с разветвленными литниками может способствовать торможению усадки и развитию горячих трещин. Идеальным для стального литья является подвод металла в прибыль.

Суммируя вышесказанное, необходимо в борьбе с горячими трещинами учитывать как свойства металла отливки, особенно доперлитную усадку, так и свойства формы, используя мероприятия по повышению их податливости.

Цель работы. Применение синтеза различных физико-химических воздействий на процессы формообразования бездефектных отливок для получения заданной структуры, свойств и эксплуатационной надежности.

Сущность и методы исследований. Исследования проводили на стали 20ГЛ ГОСТ 977-88, широко используемой в вагонном литье. Химический состав стали, (%): C – 0,15-0,25; Mn – 1,2-1,6; Si – 0,2-0,4; P – 0,040; S – 0,040. Применение этой стали обусловлено высокой ударной вязкостью при отрицательных температурах. Плавку стали проводили в индукционной тигельной печи промышленной частоты ИТПЭ-0,5 с основной футеровкой (для кислой плавки характерна более высокая жидкотекучесть металла, которая позволяет «залечивать» разрывы между твердыми кристаллами вблизи температуры солидус, однако это возможно только при чистой по сере и фосфору шихте) методом окисления. Шихтовку составляли из расчета получения после расплавления углерода ниже верхнего предела марки на 0,1-0,2%. При этом учитывалось науглероживание стали до 0,1%, за счет термодеструкции пенополистироловой модели. При расчете шихты учитывалось также, что сталь 20ГЛ имеет повышенную усадку за счет перитектической реакции $\text{Fe}_\delta \rightarrow \text{Fe}_\gamma$; особенно это заметно при содержании углерода в стали на нижнем пределе марки, совпадающем с содержанием углерода в точке J диаграммы Fe-Fe₃C (0,16%). Поэтому при выпуске плавки содержание углерода поддерживалось на уровне 0,22-0,24%. Для проведения качественной дефосфорации в завалку подавали известняк и железную руду. В процессе окисления плавки обеспечивали дальнейшую дефосфорацию, снижение содержания газов и неметаллических включений, достижение соответствующего химического состава и температуры. По данным экспресс-анализа первая проба металла содержала фосфора не более 0,03, серы 0,04, углерода примерно 0,27%; температура металла на 40-50 °C выше линии ликвидус.

Раскисление и обессеривание расплава проводилось осадочно-диффузионным способом и выдержкой под белым шлаком. Окончательное раскисление металла проводили в ковше алюминием. Модифицирование расплава проводилось в два этапа. На первом этапе дисперсную порошкообразную смесь вводили в ковш перед разливкой металла (примерно 50 %мас.); оставшуюся часть порошков вводили

в объем пенополистироловой модели. Общее количество порошка составляло 2,3% от массы металла, заливаемого в форму. Состав порошка подбирали исходя из следующих соображений:

– критический интервал образования горячих трещин для углеродистых сталей составляет, как указывалось выше, 1250-1450 °С. Поэтому в этом температурном интервале должны быть созданы максимально благоприятные условия для повышения прочностных и пластических характеристик сплава. Однако при высоких температурах легирующие элементы, в том числе углерод, находятся в твердом растворе Fe_γ либо Fe_δ и не могут оказывать сколько-нибудь заметного влияния на прочность. Для решения этой задачи в расплав вводили активные дисперсные порошки (дисперсноупрочняющие материалы), служащие модификаторами II рода: карбиды WC, TiC, TaC, нитриды, карбонитриды. Эти высокотемпературные соединения, располагаясь по границам, измельчают зерно первичной кристаллизации в гетерогенной системе, характерной особенностью которой является многостадийность: 1 – диффузионный подвод порошков к границе раздела фаз, 2 – адсорбция порошков на поверхности первичных зерен, 3 – диффузионный отвод продуктов превращения. При этом существенную роль играет распределение и плотность дефектов границ зерен первичной кристаллизации, определяющих миграцию и рост зерен. Такие добавки упрочняют границы зерна и могут оказывать влияние на устойчивость отливки к образованию горячих трещин.

При введении в объем дисперсноупрочняющих порошков, не взаимодействующих с матрицей и не растворяющихся в ней, создается композиционная отливка, позволяющая заметно увеличивать комплекс механических характеристик сплава. В данном случае эффективность торможения движения дислокаций по краудсионному типу приводит к одновременному повышению пластичности и прочности сплава в критическом температурном интервале образования горячих трещин (в низкоуглеродистых и низколегированных сталях выпадение фазы из твердого раствора по границам зерен отсутствует а priori). Кроме диффузионного процесса, механизм упрочнения зависит от формы введенных частиц и отношения длины l к диаметру d . Влияние геометрических параметров на упрочнение описывается формулой [13]:

$$\sigma = \sigma_p + k \left(\frac{l}{d} - 1 \right), \quad (1)$$

где σ_p – прочность, если $\frac{l}{d} = 1$.

– дисперсные добавки благотворно влияют на изотропию свойств отливок в различных сечениях, снижают скорость ликвационных процессов (особенно серы), склонность к трещинообразованию. Действенным средством дисперсные порошки выступают в роли микрохолодильников, создающих условия для увеличения скорости охлаждения тепловых узлов, выравнивания температурных полей отливок и снижения доперлитной усадки.

При выборе способа формообразования для изготовления отливок предпочтение было отдано литью по газифицируемым моделям (ЛГМ) из пенополистирола, который основывается на применении неизвлекаемой из формы модели. При ЛГМ доперлитная усадка уменьшается за счет снятия теплоты перегрева металла и хорошей податливости формы из несвязанного кварцевого песка, имеющего остроугольную форму зерен. При этом, несмотря на более сложное уплотнение, такие пески противостоят внешнему давлению, имеют высокую газопроницаемость, что снижает брак отливок при ЛГМ. Часть реакций термодеструкции модели с жидким металлом носит экзотермический характер, что уменьшает потери тепловой энергии на процесс и приводит к лучшей заполняемости формы.

Отливки изготавливали по базовой технологии, разработанной на ОАО «Камет-ТАС». Это предусматривало использование пенополистирола «Shell» марки «Styoshell» Д833А. Процесс изготовления моделей основан на двухстадийной тепловой обработке исходных гранул. После предварительного вспенивания и подсушки гранул их смачивают полимером, обладающим высокой адгезией к поверхности гранул (например, ДС-РАС, поливинилбутираль и др.). Затем следует обволакивание гранул дисперсноупрочняющими порошками с последующей сушкой. Спекание моделей (рис. 2, а) в пресс-форме производили с использованием парового стерилизатора. Плотность моделей составляла 0,025-0,035 г/см³.

Сборку модельных блоков осуществляли напайкой моделей на пенополистироловый стояк. Затем следовало покрытие моделей противопригарной краской Disopast 6230/8. При формовке модельных блоков использовали «кипящий слой», затем опоки перемещали на вибростол, уплотняли 60-80 с и устанавливали литниковую чашу. Перед заливкой форму вакуумировали при 0,05 МПа, что увеличивает ее заполняемость и воспроизводимость рельефа. Заливку металла производили из стопорного ковша. Скорость подъема металла в полости формы $V_{мет}$ определяли по уравнению [14]:

$$V_{мет} = \frac{F_{пит}}{F_{мод}} \mu \sqrt{2g \left(H_p - \frac{P_\phi}{\gamma_{мет}} \right)}, \quad (2)$$

где $F_{пит}$ и $F_{мод}$ – соответственно поперечное сечение питателя и полости формы (модели); μ – коэффициент расхода; H_p – гидростатический напор металла; $\gamma_{мет}$ – плотность металла; P_ϕ – газовое давление в зазоре δ .

Механические испытания образцов стали 20ГЛ, отливаемых одновременно с деталями автосцепки (рис. 2, б) показали следующие результаты: σ_b – 565 МПа; σ_T – 420 МПа; δ_5 – 23%; ψ – 32%; КСУ – 495 кДж/м². Наличие трещин в отливках контролировалось магнитной дефектоскопией. В опытной партии композиционных отливок, полученных по технологии объемного армирования, горячих трещин не обнаружено.



а



б

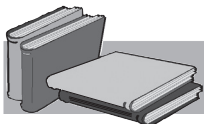
Рис. 2. Пенополистироловая модель детали автосцепки (а); готовая отливка (б)

Выводы

Горячие трещины в стальных отливках снижают эксплуатационную надежность литых деталей и конкурентоспособность литья, как основной заготовительной базы машиностроения.

Анализ причин образования горячих трещин обнаруживает большое количество факторов, оказывающих влияние на этот дефект отливок. Причинами формирования трещин являются свойства металла, в частности, доперлитная усадка сплава, с другой стороны, низкая податливость формы приводит к

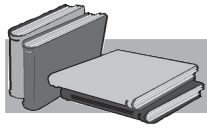
образованию литейных напряжений, превышающих прочность металла в критической области формирования горячих трещин. Для борьбы с горячими трещинами использован синтез физико-химического воздействия на расплав и форму с использованием объемного армирования и получения композиционной отливки. В качестве литейной технологии применяли метод литья по газифицируемым моделям. Механические характеристики стали 20ГЛ при этом повышены на 5-7%. Контроль отливок методом магнитной дефектоскопии установил отсутствие горячих трещин в опытной партии.



ЛИТЕРАТУРА

1. Osann B. Moderne Stahlgießerei für Unterricht und Praxis. I. Springer, 1936. – 226 p.
2. Нехендзи Ю. А. Стальное литье. – Москва: Metallurgizdat, 1948. – 766 с.
3. Рыжиков А. А. Теоретические основы литейного производства. – Москва-Свердловск: Mashgiz, 1961. – 446 с.
4. Василевский П. Ф. Технология стального литья. – Москва: Машиностроение, 1974. – 408 с.
5. Флемингс М. К. Процессы затвердевания. – Москва: Издательство «Мир», 1977. – 423 с.
6. Константинов Л. С., Трухов А. П. Напряжения, деформации, трещины в отливках. – Москва: Машиностроение, 1981. – 198 с.
7. Справочник по чугунному литью / Под ред. Н. Г. Гиршовича. – Л.: Машиностроение, 1978. – 758 с.
8. Гуляев А. П. Металловедение. – Москва: «Металлургия», 1986. – 544с.
9. Металловедение: учебник для ВУЗов. Под ред. Б. Н. Арзамасова. – Москва: Машиностроение, 1986. – 384 с.
10. Огородникова О. М., Пигина Е. В., Мартыненко С. В. Компьютерное моделирование горячих трещин в литых деталях // Литейное производство. – 2007. – № 2. – С. 27-30.
11. Огородникова О. М., Мартыненко С. В., Грузман В. М. Прогнозирование кристаллизационных трещин в стальных отливках // Литейное производство. – 2008. – № 10. – С. 29-34.

12. Соколов Н. А. Литье в оболочковые формы. – М.: Машиностроение, 1978. – 461 с.
13. Оболенцев Ф. Д. Физикохимия и технология композиционного литья. – Одесса: ОПИ, 1984. – 97 с.
14. Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. – СПб.: НПО «Профессионал», 2007. – 408 с.



REFERENCES

1. Osann B. (1936). Moderne Stahlgießerei für Unterricht und Praxis. I. Springer, 226 p. [in German].
2. Nekhendzi Yu. A. (1948). Stal'noe lit'e [Steel casting]. Moscow: Metallurgizdat, 755 p. [in Russian].
3. Ryzhikov A. A. (1961). Teoreticheskie osnovy liteinogo proizvodstva [Theoretical foundations of foundry]. Moscow-Sverdlovsk: Mashgiz, 446 p. [in Russian].
4. Vasilevskii H. F. (1974). Tehnologiiia stal'nogo lit'ia [The technology of steel casting]. Moscow: Mashinostroenie, 408 p. [in Russian].
5. Flemings M. K. (1977). Protsesy zatverdivaniia [The processes of solidification]. Moscow: Mir, 423 p. [in Russian].
6. Konstantinov L. S., Trukhov, A. P. (1981). Napriazheniia, deformatsii, treshchiny v otlivkakh [Stress, strain, cracks in the casting]. Moscow: Mashinostroenie, 198 p. [in Russian].
7. Girshovich N. G. (1978). Spravochnik po chugunnomu lit'iu. [Reference book of iron casting]. Leningrad: Mashinostroenie, 758 p. [in Russian].
8. Guliaev A. P. (1986). Metallovedenie [Metallography]. Moscow: Metallurgiiia, 544 p. [in Russian].
9. Arzamasova B. N. (1986). Materialovedenie: uchebnik dlia vuzov. [Materials: textbook for universities]. Moscow: Mashinostroenie, 384 p. [in Russian].
10. Ogorodnikova O. M., Pigina E. V., Martynenko S. V. (2007). Komp'uternoe modelirovanie goriachikh treshchin v litykh detaliakh [Computer simulation of hot cracks in cast parts]. Liteinoe proizvodstvo, no. 2, pp. 27-30. [in Russian].
11. Ogorodnikova E. V., Martynenko S. V., Gruzman V. M. (2008). Prognozirovanie kristallizatsionnykh treshchin v stalnikh otlivkakh [Prediction of crystallization cracks in steel castings]. Liteinoe proizvodstvo, no. 10, pp. 29-34. [in Russian].
12. Sokolov N. A. (1978). Lit'e v obolochkovye formy [Casting in shell molds]. Moscow: Mashinostroenie, 461 p. [in Russian].
13. Obelentsev F. D. (1984). Fizikokhimiia kompozitsionnogo lit'ia [Physicochemistry and technology of composite casting]. Odessa: ОПИ, 97 p. [in Russian].
14. Shuliak V. S. (2007). Lit'ie po gazifitsiruemyim modeliam [Casting on gasified models]. SPb.: NPO Professional, 408 p. [in Russian].

Анотація

Ясюков В. В., Лисенко Т. В., Солоненко Л. І., Чередник В. А.

**Аналіз і синтез фізико-хімічного впливу на експлуатаційну надійність
ВИЛИВКІВ**

Показано вплив гарячих тріщин на експлуатаційну надійність литих деталей. Проаналізовано природу виникнення цього дефекту. Запропоновано інноваційну технологію підвищення якості лиття за рахунок отримання композиційних виливків з використанням пінополістиролових моделей.

Ключові слова

Гарячі тріщини, доперлітна усадка сплаву, податливість форм і стрижнів, пінополістиролові моделі, об'ємне армування композиційних виливків.

Summary

Yasiukov V., Lysenko T., Solonenko L., Cherednik V.

**Analysis and synthesis of physico-chemical impact on the operational
reliability of the castings**

It has been shown the influence of hot cracks on the operational reliability of cast parts. It has been analyzed the nature of this defect. It was proposed the innovative technology to improve the quality of the castings due to the production of composite castings with the use of polystyrene models.

Keywords

Hot cracking, prepearlite shrinkage of the alloy, the ductility of molds and cores, polystyrene models, three-dimensional reinforcement of composite castings.

Поступила 10.11.16