УДК 622.621.311.21

Буданов Вадим Андреевич, аспирант
(НовГУ, г. Великий Новгород)
Budanov Vadim Andreevich, postgraduate student
(NovSU, Veliky Novgorod)

ДЕФЕКТЫ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ КАЧЕСТВА

DEFECTS IN STEEL CASTINGS OF BODY PARTS OF PIPING FITTINGS AND MODERN METHODS FOR ENSURING THEIR QUALITY

Аннотация. Рассмотрены основные группы дефектов стальных корпусных отливок трубопроводной арматуры, причины их возникновения, влияние на работоспособность и методы выявления. Особое внимание уделено усадочной и газовой пористости, неметаллическим включениям, горячим трещинам, недоливам и поверхностным дефектам. Показано, что для деталей, работающих под давлением, задача обеспечения качества должна решаться как совокупность металлургических, тепловых, гидродинамических и контрольных мероприятий. На примере опубликованных исследований корпусов задвижек показана эффективность сочетания численного моделирования затвердевания, рентгеновской компьютерной томографии и металлографического анализа. Предложена схема дальнейшего исследования корпуса регулирующего клапана из стали 25Л.

Abstract. The main groups of defects in steel body castings of pipeline valves, the causes of their occurrence, their impact on performance, and methods for detecting them are considered. Special attention is paid to shrinkage and gas porosity, non-metallic inclusions, hot cracks, under-filling, and surface defects. It is shown that for parts operating under pressure, the task of ensuring quality must be addressed as a combination of metallurgical, thermal, hydrodynamic, and control measures. Using the example of published studies of valve bodies, the effectiveness of combining numerical modeling of solidification, X-ray computed tomography, and metallographic analysis is demonstrated. A scheme for further research into the body of a control valve made of 25L steel is proposed.

Для корпусной детали трубопроводной арматуры дефект литья имеет двойное значение. С одной стороны, он характеризует устойчивость технологического процесса; с другой – может находиться в границе давления или в зоне локальной концентрации напряжений и тем самым влиять на ресурс и герметичность изделия.

Поэтому классификация дефектов должна быть связана не только с их внешним видом, но и с механизмом возникновения, расположением и возможным влиянием на эксплуатацию.

ASM Handbook выделяет семь базовых групп литейных дефектов: металлические выступы, полости, несплошности, дефекты поверхности, неполное заполнение, размерные отклонения, а также включения и структурные аномалии [1]. Для стальных корпусных деталей наибольший интерес представляют усадочные полости и пористость, газовая пористость, неметаллические включения, горячие трещины и дефекты заполнения формы.

Для арматуры атомных станций нормативные требования распространяются на изготовление и испытания изделия [2], а материалы оборудования должны выбираться с учетом механических свойств, технологичности и работоспособности [3]. Таким образом, формирование бездефектной отливки является частью обеспечения надежности готового изделия.

Усадка возникает вследствие изменения удельного объема металла при охлаждении и затвердевании. Пока область отливки сохраняет гидравлическую связь с прибылью или другой зоной жидкого металла, возникающий дефицит объема может компенсироваться питанием. Если питающий канал перекрывается затвердевшим металлом до завершения усадки теплового узла, формируются макроусадочная раковина либо распределенная усадочная пористость.

Расположение усадочного дефекта связано с последовательностью затвердевания. Геометрические утолщения, пересечения стенок, фланцевые переходы и другие участки с повышенным отношением объема к охлаждаемой поверхности затвердевают позднее и формируют тепловые узлы. Поэтому конструкция детали и литейная технология должны рассматриваться совместно.

Практическая значимость этой проблемы для трубопроводной арматуры подтверждена исследованием корпуса задвижки Class 300 из стали ASTM A216 WCB. Рентгеновская компьютерная томография и сканирующая электронная микроскопия выявили как макро- и микроусадочную, так и газовую пористость [4]. В последующей работе численное моделирование и изменение технологических параметров позволили существенно снизить выраженность усадочной пористости в опытной отливке [5].

Газовые полости в отливке появляются по нескольким причинам: растворённые в жидком металле газы выделяются при кристаллизации, поток захватывает воздух, металл взаимодействует с формой и стержнями, а также газы локально накапливаются по ходу заполнения. По форме газовые поры чаще округлые, и этим они отличаются от усадочной пористости. Но фактическая морфология зависит от стадии образования и от давления окружающего металла, так что «круглая пора – значит газовая» работает не всегда.

Чтобы газовой пористости было меньше, контролировать приходится сразу несколько вещей: металлургическую подготовку расплава, состояние и влажность формовочных материалов, газопроницаемость формы, режим заполнения и

турбулентность потока. Отдельно стоит сказать про литниковую систему. Чрезмерные скорости и падение струи дают захват воздуха и оксидных плёнок. Отсюда практический вывод: моделирование заполнения формы нужно не только для оценки времени заливки, но и для поиска зон с интенсивной турбулентностью.

Неметаллические включения – это продукты раскисления, частицы шлака, оксиды, а также продукты взаимодействия металла с огнеупорами и формовочной смесью. Опасность включений определяется не только объёмной долей. Размер, форма и расположение тоже важны. Если включение оказывается в зоне растягивающих напряжений, оно работает как локальный концентратор и может инициировать трещину.

Технологические меры здесь такие: контроль плавки и раскисления, выдержка и очистка металла, исключение повторного окисления струи, фильтрация, рациональная конструкция шлакоуловителей, спокойное заполнение формы. Если речь идёт о численном исследовании, дополнительно имеет смысл смотреть траектории потока и зоны, где поверхность расплава может повторно вовлекаться в объём.

Горячие трещины – дефект периода затвердевания. В современных обзорах их трактуют как результат совместного действия трёх факторов: металлургического охрупчивания полутвердой зоны, деформаций от термической усадки и ограничений со стороны формы и геометрии отливки [6]. Для стали механизм осложняется сегрегацией элементов и резким снижением пластичности в определённом интервале доли твёрдой фазы.

Исследования показывают, что горячее разрушение связано с состоянием дендритной сетки. После утраты возможности свободного питания жидкой фазой возникающая растягивающая деформация может привести к междендритному разрыву [7]. На вероятность дефекта влияют химический состав, температура заливки, скорость охлаждения, геометрические концентраторы деформаций и жёсткость стержней.

Для корпуса клапана опасны переходы от толстых фланцев и бобышек к стенке корпуса, седловая зона и места локального ограничения усадки стержнями. Поэтому прогноз горячих трещин желательно выполнять совместно с анализом температурных полей и напряжённо-деформированного состояния отливки.

Недолив получается, когда металл теряет текучесть до завершения заполнения формы. Спай – это когда встречаются потоки, поверхности которых уже частично окислены или охлаждены и полноценного металлического соединения не дают. Вероятность таких дефектов растёт при недостаточной температуре заливки, малом сечении питателей, длинном пути потока и неблагоприятной последовательности заполнения.

Поверхностные дефекты – пригар, проникновение металла в формовочную смесь, засоры, складки, неровности. Часть из них удаляется механической обработкой, но для корпусных деталей важно заранее учитывать, какие поверхности остаются необрабатываемыми. Внутренняя проточная поверхность

влияет на гидравлическое сопротивление и локальные зоны кавитации, поэтому для регулирующей арматуры качество поверхности имеет не эстетическое, а функциональное значение.

Таблица 1 – Связь дефекта с эксплуатационной функцией

Дефект	Основная причина	Возможное влияние	Методы выявления
Усадочная макропористость	Тепловые узлы, недостаточное питание	Снижение эффективного сечения, концентрация напряжений, потенциальная негерметичность	РК/КТ, УЗК, металлография
Микроусадка	Низкий температурный градиент и затрудненное междендритное питание	Снижение пластичности и усталостной долговечности	КТ, металлография, косвенно УЗК
Газовая пористость	Газонасыщение, захват воздуха, газовыделение формы	Локальное ослабление сечения, возможная негерметичность	РК/КТ
Неметаллические включения	Шлак, оксиды, продукты раскисления	Концентрация напряжений, инициирование трещин	УЗК, РК, металлография
Горячие трещины	Усадочная деформация полутвердой зоны при ограниченном питании/податливости	Критическая несплошность, рост трещины	ВИК, МК, ПВК, УЗК/РК
Недолив/спай	Недостаточная жидкотекучесть, неблагоприятное заполнение	Нарушение геометрии и сплошности	ВИК, РК

Дефекты дешевле предупреждать, чем потом выявлять и ремонтировать. Для ответственной корпусной отливки система обеспечения качества должна опираться на несколько направлений.

Металлургическое направление охватывает химический состав, температуру, раскисление, удаление шлака и газов. Гидродинамическое направление требует контролировать заполнение, не допускать чрезмерной турбулентности и захвата воздуха. Тепловое направление обеспечивает направленное затвердевание и надёжное питание тепловых узлов. Контрольное направление включает визуальный осмотр, капиллярный или магнитопорошковый контроль, радиографию или томографию, ультразвук и механические испытания. Объём контроля определяется требованиями к изделию.

Численное моделирование стоит включать между конструкторской и производственной стадиями. До изготовления модельной оснастки оно позволяет оценить последовательность заполнения, положение последней затвердевающей жидкости, критерии склонности к пористости и эффективность прибылей и холодильников. При этом расчёт не заменяет контроль готовой отливки. Он нужен для другого: снизить риск дефекта и определить наиболее критические зоны, которые потом и будут верифицироваться.

В дальнейшей работе предлагается использовать корпус регулирующего клапана DN 150 PN 100 как сквозной объект исследования. Материал — сталь 25Л. Сначала создаётся базовая модель литейного процесса без оптимизации. По ней определяются время заполнения, поля температуры, последовательность затвердевания и области вероятной усадочной пористости.

Затем варьируются положение и объём прибылей, расположение холодильников, сечения литниковой системы и температура заливки. Критерий оптимизации требует не только уменьшить расчётный объём пористости, но и перенести последнюю затвердевающую зону из тела корпуса в прибыль. После этого изготавливается опытная отливка, и прогнозируемые дефектные зоны сопоставляются с результатами РК/КТ, УЗК и металлографического исследования.

Заключение

Качество стальной корпусной отливки складывается из металлургических, гидродинамических и тепловых процессов. Для ответственной арматуры наиболее опасны усадочная и газовая пористость, неметаллические включения и горячие трещины. Механизмы образования у них разные, поэтому одним универсальным технологическим мероприятием все эти дефекты устранить нельзя.

Наиболее перспективная методология сочетает численное моделирование заполнения и затвердевания с направленным неразрушающим и металлографическим контролем опытной отливки. Для корпуса регулирующего клапана из стали 25Л такой подход позволяет перейти от общего требования «обеспечить качество литья» к количественной оптимизации конкретных зон риска и затем экспериментально верифицировать технологию.

Список литературы

1. DasGupta R. Common Defects in Various Casting Processes // ASM Handbook. Vol. 15: Casting. – ASM International, 2008. – P. 1192–1202. – DOI: 10.31399/asm.hb.v15.a0005344.
2. НП-068-05. Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования: федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. – Введ. 2005.
3. ПНАЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М. : Энергоатомиздат, 1989.
4. Mahomed N., Kleynhans H.A. Reducing Shrinkage Porosity in High-Performance Steel Castings: Case of an ASME B16.34 Gate Valve Body: Part 1–Analysis, Techniques and Experimental Approach // International Journal of Metalcasting. – 2018. – Vol. 12, no. 4. – P. 919–926. – DOI: 10.1007/s40962-018-0226-3.
5. Mahomed N., Kleynhans H.A. Reducing Shrinkage Porosity in High-Performance Steel Castings: Case of an ASME B16.34 Gate Valve Body: Part 2–Simulation and Experimental Verification // International Journal of Metalcasting. – 2019. – Vol. 13, no. 2. – P. 463–472. – DOI: 10.1007/s40962-018-0275-7.
6. Lu Y., Bartlett L., O'Malley R.J. A Review on Hot Tearing of Steels // International Journal of Metalcasting. – 2022. – Vol. 16, no. 1. – P. 45–61. – DOI: 10.1007/s40962-021-00599-3.
7. Monroe C., Beckermann C. Development of a hot tear indicator for steel castings // Materials Science and Engineering A. – 2005. – Vol. 413. – P. 30–36. – DOI: 10.1016/j.msea.2005.09.047.
8. ГОСТ 977-88. Отливки стальные. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1988.
9. ASTM A216/A216M-26. Standard Specification for Steel Castings, Carbon, Suitable for Fusion Welding, for High-Temperature Service. – ASTM International, 2026.