

УДК 620.1

Влияние структуры чугуна на образование эксплуатационных дефектов стеклоформующей оснастки

Леушин И. О.¹, Чистяков Д. Г.^{1,*},
Володин В. А.²

[*91_liza@mail.ru](mailto:91_liza@mail.ru)

¹Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

²ОАО «Нормаль», Нижний Новгород, Россия

При изготовлении в массовом порядке стеклянных изделий (миллионы штук) стеклотарных заводы сталкиваются с проблемой хаотичной выбраковки деталей стеклоформующей оснастки (формовых комплектов), выходящих из строя ввиду сложных термомеханических условий эксплуатации оборудования. Эксплуатационная стойкость данных деталей в среднем по России не превышает 550 тыс. термоциклов, а формовых комплектов отечественного изготовления – 400 тыс. Наличие термических и структурных напряжений в детали инициирует трансформацию структуры чугуна в отдельных частях формового комплекта, приводит к появлению дефектов на рабочих поверхностях оснастки и изготовлению стеклянной тары со складками, недооформлениями, шагренью, заусенцами, наплывами и другим браком. В работе представлены меры борьбы с формированием данных дефектов.

Ключевые слова: чугун, стеклоформующая оснастка, структура

Введение

Стеклоформующая оснастка (рис. 1) – это совокупность деталей, характеризующих формовой комплект для выдува (прессования) стеклянных изделий, обеспечивающая получение стеклоупаковки от капли расплавленного стекла до конкретной банки, бутылки, флакона, колбы и т.д. Особенностью изготовления полой стеклянной тары является способность формообразования за счет процессов прессования, прессовывадувания или выдувания стеклянного изделия. Наибольшую популярность получили прессование (Press Process – PP-процесс), способ двойного выдувания (Blow blowing – BB-процесс) и прессовывадувной способ (Narrow Neck Press & Blow – NNPB-процесс).

Изготовление узкогорловой стеклотары (бутылки, колбы и т.п.) осуществляют преимущественно BB-методом по принципу использования двух форм: черновой – металлоконструкции, в которой выдувается стеклянное изделие предварительных размеров и конфигурации, и чистовой – металлоконструкции, в которой выдувается

стеклянное изделие уже потребительских размеров и форм. В процессе выдувания стекла применяются – в зависимости от характера подачи расплава стекла – машины с капельным питанием, машины фидерного типа (например, полуавтоматы ВШМ, ВВ-2 и автоматы 2ЛАМ, Л-10, АВ-4, АВ-4-2, АВ-6 АВ-6-2, ВВ-7) и машины с вакуумным питанием (например, автоматы ВВ-6, ВВМ-10, ВР-24, ВС-24, ВК-18).

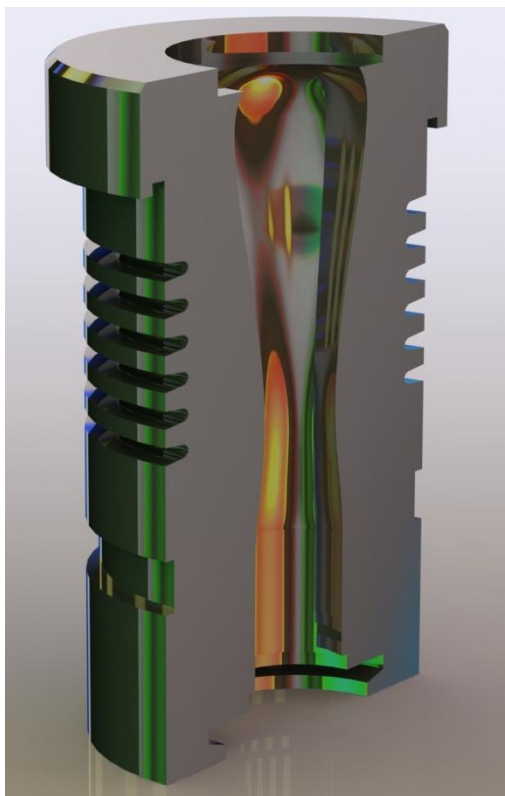


Рис. 1. Деталь стеклоформирующей оснастки

Проблема исследования

Стеклоформирующая оснастка, как правило, эксплуатируется в условиях высоких температур (достигающих 750...850 °С для черновых форм, 450...550 °С – для чистовых), а традиционно экономически и технологически оправданным материалом ее изготовления служит серый чугун с пластинчатой формой графита (СЧПГ).

Микроструктура такого материала до и после травления представлена на рис. 2.

Для изготовления литых заготовок стеклоформирующей оснастки применяют способ литья расплава чугуна в песчано-глинистую форму на металлический холодильник, который формируется твердый мелкозернистый слой на рабочей части литой детали. Побочным результатом измельчения эвтектических зерен является вырождение графитовых включений до междендритного аномального расположения, а также – за счет эффекта переохлаждения – формирование структурно-свободного цементита и (реже) ледебурита в феррит-перлитной или перлит-ферритной металлической основе.

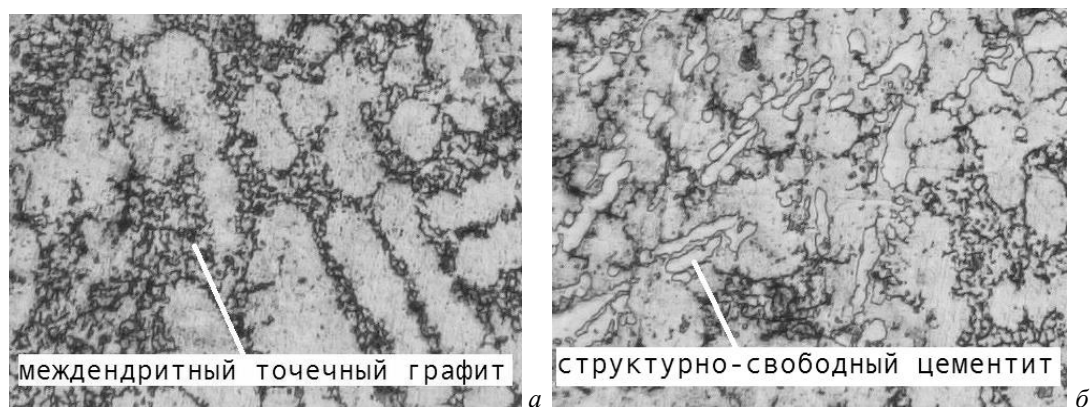


Рис. 2. Микроструктура литого чугуна деталей стеклоформ: *а* – не травленая, $\times 250$; *б* – травленая ниталом, $\times 250$

Последующей термической обработкой (как правило, высокотемпературный отжиг) мелкие включения цементита литья устраняются, а крупные – измельчаются, металлическая матрица становится ферритной или феррит-перлитной.

Однако в процессе эксплуатации стеклоформирующей оснастки, изготовленной из такого материала, выявляются следующие недостатки: низкая прочность (менее 300 МПа) и твердость (15...19 HRC) формообразующих стеклянную тару поверхностей, низкая теплопроводность (за счет наличия мелкораздробленного цементита), низкая термостойкость (выгорание графитовой фазы с образованием микрополостей на поверхности оснастки), низкая окалинотойкость (попадания кислорода в межзеренное пространство "феррит – графит") и т.д. Дефекты выхода из строя деталей из такого материала: шагреня на стеклянной таре (выгорание графитовых включений), нарушение сплошности поверхности формового комплекта, окисление и т.д. Предельная стойкость – 200...400 тыс. термоциклов.

Это связано с тем, что в процессе эксплуатации чугуна происходит значительная трансформация его структуры (рис. 3). Критическим фактором, способствующим трансформации структуры чугуна (и соответственно изменению ключевых механических и эксплуатационных свойств материала в целом), является аномальная форма графита (междендритная, точечная и розеточная), присутствующая уже в литом состоянии чугуна и формирующая "искаженную" структуру (с высокой степенью концентрации напряжений) на последующих за термической обработкой жизненных циклах формового комплекта. Это приводит к тому, что твердость чугуна на глубине 10...15 мм от рабочей поверхности в процессе жизненного цикла падает с 45...50 до 15...19 HRC, а поверхностная твердость – с 234...282 до 215 HV.

Помимо этого, негативным фактором, оказывающим значительное воздействие на структуру чугуна, является формирование избыточного количества структурно-свободного цементита (как в процессе изготовления литой заготовки, так и после проведения операций упрочнения рабочих кромок и формообразующих поверхностей). По этой причине высокая поверхностная твердость (234...282 HV) затрудняет проведение

операций механической обработки, шлифования и полирования, а избыточная побочная фаза литья – как структурно-свободный цементит, так и цементит в связанном состоянии – достаточно легко может быть устранена последующей термической обработкой отливок. Однако внедрение в технологический процесс упрочняющих физических методов воздействия на рабочие поверхности деталей "сводит на нет" гомогенизирующий, декарбидизирующий и ферритизирующий эффекты термической обработки за счет формирования новых перекристаллизовавшихся зерен в обрабатываемых (упрочняемых) слоях. То есть происходит трансформация структуры чугуна и это негативным образом сказывается на работоспособности деталей, и они выходят из строя по различным причинам.

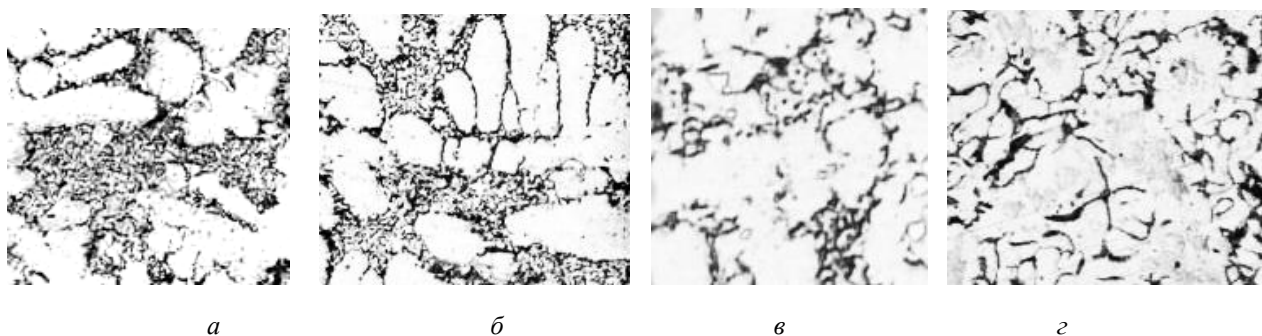


Рис. 3. Трансформация структуры СЧПГ в процессе жизненного цикла стеклоформирующей оснастки, $\times 100$:
а – литая; *б* – после термической обработки; *в* – после упрочнения; *г* – после эксплуатации (300 тыс. теплосмен)

Причины дефектообразования

Одним из процессов трансформации исходной структуры чугуна (вследствие которой происходит выгорание углерода с поверхности детали) в процессе простоя числа теплосмен является эксплуатационная графитизация (первая причина). При термоциклировании в температурном интервале выше $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращения происходит не только увеличение в объеме графитовых включений за счет процессов графитизации, но и их коалесценция, при этом в частях детали стеклоформы с относительно крупными включениями (внутренние слои) происходит лишь незначительный прирост объема графитовых зерен и перераспределение перлита. В дальнейшем графитовые включения выкрашиваются с поверхности материала (рис. 4).

Второй причиной выхода из строя деталей стеклоформ является появление микротрещин на рабочих кромках изделий и/или формообразующих поверхностях (~25% дефектов). Образование трещин в деталях такого типа объясняется тем, что в течение эксплуатационного периода в стеклоформе происходит накопление напряжений растяжений и сжатий, вызываемых неравномерной температурной деформацией детали из-за формирования неоднородного температурного поля по сечению стеклоформы. При скоростном циклическом воздействии в толще детали возникают остаточные напряжения (сжатий и растяжений), которые и обуславливают накопление деформаций и напряжений

в металлоизделии. В этих условиях происходит разрушение детали (появление микротрещины) – достижение материалом детали предельных степеней деформации и напряжений [1].



Рис. 4. Макроструктура детали после эксплуатации на стеклодувном автомате ВВ-7 в составе автоматической линии ЛУС-2

Однако величины напряжений и деформаций зависят от структуры материала и термических условий эксплуатации детали. При этом очевидно, что детали стеклоформ работают в скоростном режиме "открытия–закрытия", при котором формирование трещин происходит в результате больших нагрузок и малой деформации конструкции формового комплекта.

Третьей причиной, приводящей к досрочному выходу из строя деталей стеклоформ, является интенсивное окисление рабочих поверхностей (~25% дефектов) (рис. 5). С ростом температуры (разогревом) формового комплекта происходит с большей скоростью окисление рабочих поверхностей, что обуславливает высокий уровень износа, сопровождающийся, прежде всего отслаиванием образующихся окисных плен и проникновением атомов кислорода в толщу металлической формы (по границам межфазных поверхностей). Механизм образования окисных слоев в процессе эксплуатации деталей стеклоформ достаточно трудно отслеживаемый процесс, сопровождающийся большим числом химических реакций на поверхности расплавленного стекла, имеющего в своем составе окислы SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , Fe_2O_3 , SO_3 , и металлической формы. Это способствует изменению скорости течения этих химических реакций с увеличением температуры на границе "стеклоформа–жидкое стекло", появлению защитных фаз и нарушению сплошности чугуна.



Рис. 5. Развитие элементов окисления на формообразующих поверхностях деталей стеклоформ типа АЛ-1110 ТО-43-1000-Гелиос.211 после 150...250 тыс. теплосмен

Помимо вышеописанных дефектов, возникающих в деталях стеклоформ в процессе эксплуатации, имеются дефекты разрушения материала формы в результате ударных механических нагрузок на контактные поверхности (~9% дефектов). В результате таких нагрузок повреждаются угловые кромки (охрупчивание и выламывание) и их дальнейшее восстановление является затруднительным. Это связано с тем, что процесс пластического течения материала детали меняется в зависимости от сочетания напряжений, температур и размера зерен металлической основы и графитовых включений. В результате такого механизма – при эксплуатации детали – деформация ее рабочего слоя (под действие усилия дутья расплавленного стекла) происходит посредством диффузии вакансий через зерна и/или по границам зерен. Данный процесс происходит под действием высоких температур (750...850 °С), что задает определенный вектор развития трещины – как правило, по границам зерен твердых включений (цементита) – в направлении максимального разогрева по центрам перегрузки (зон максимальных пластических напряжений) в детали при ее эксплуатации. В конечном счете, рабочие кромки детали разрушаются – выламываются.

Наименее затратным и технологически эффективным способом борьбы с данными дефектами является намеренное изменение формы графитовых включений, оказывающих исключительное влияние на свойства материала [2]. Проведение операций сфероидизирующего и графитизирующего модифицирований с целью формирования графитовых включений шаровидной формы обеспечивает повышение прочности чугуна (до 300...400 МПа) и защищенности графитовой фазы от выгорания и выкрашивания с рабочих поверхностей, но при этом снижается теплопроводность материала (до ≈ 35 Вт/м·град). Предельная эксплуатационная стойкость деталей составляет 450 тыс. теплосмен. При этом основным дефектом выхода из строя деталей становится трещинообразование в зонах максимального теплового удара (рис. 6).

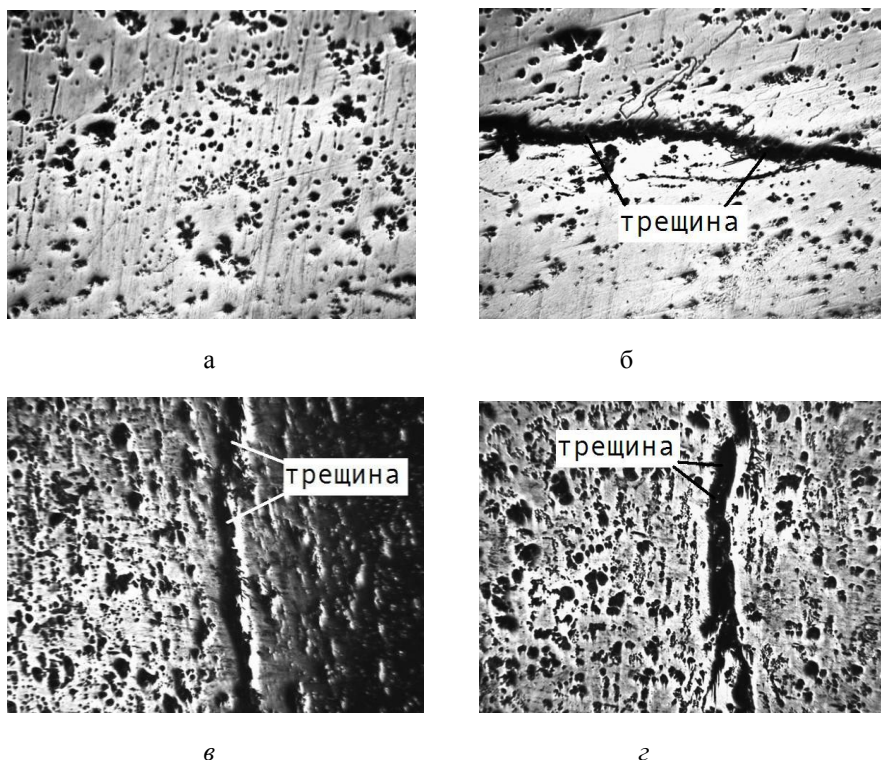


Рис. 6. Микроструктура деталей стеклоформ из модифицированного чугуна, $\times 100$: *а* – микроструктура до эксплуатации [не травлено]; *б* – трещина после 0,55 млн термоциклов [не травлено]; *в, г* – тоже [травлено ниталом]

Меры борьбы с эксплуатационными дефектами

Анализ жизненного цикла изделий стеклоформ и отечественный опыт повышения их эксплуатационной стойкости показал, что основными методами борьбы с преждевременным выходом деталей из строя могут выступать [3, 4, 5]: физические методы упрочнения ответственных поверхностей деталей (рабочих кромок и формообразующих поверхностей) с целью повышения их износостойкости; легирование расплава чугуна карбидообразующими и окалинозащитными элементами, способными как повысить прочность изделия и снизить рост чугуна (за счет внедрения в металлическую матрицу мелких включений сложнолегированных карбидов), так и создать сложную оксидную плену из двойных окислов шпинельной структуры с малым параметром решетки (например, FeCr_2O_4 , FeAl_2O_4 , NiFe_2O_4 , NiCr_2O_4); структурирование детали посредством изготовления литой заготовки с заданной микроструктурой чугуна, обуславливаемой необходимой металлической матрицей (феррит или аустенит) и состоянием графитовой фазы (шаровидная, вермикулярная или пластинчатая форма).

Таким образом, достижения высокого результата в повышении стойкости формовых комплектов можно добиться за счет регулирования химического состава чугуна и степени его структуризации, то есть повышения ключевых характеристик:

- термостойкости рабочего (наиболее нагружаемого) слоя детали стеклоформы;

- окалиностойкости контактных с атмосферой цеха и расплавленным стеклом поверхностей (рабочие кромки, формообразующие грани);
- ростоустойчивости узлов, разогреваемых до температур $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращения для заданного химического состава чугуна;
- прочности формообразующих поверхностей и рабочих кромок для устранения возможного коробления формового комплекта в процессе роста числа теплосмен;
- теплопроводности, достаточной для отведения излишек тепловой энергии от контактных с расплавленным стеклом поверхностей.

Условия образования термоусталостного разрушения детали стеклоформы определяются видом нагруженного состояния в зоне потенциального трещинообразования при термоциклическом нагружении. Это способствует тому, что на критические условия разрушения при неизотермическом нагружении существенно будет влиять знак циклической пластической деформации при максимальной температуре цикла. Таким образом, для деталей стеклоформ присуще сочетание температурного (нагрев $\leftrightarrow$ охлаждение) и силового (удар стекломассы $\leftrightarrow$ удаление стеклянного изделия из формы) циклов: деформация сжатия осуществляется при максимальной температуре разогрева формового комплекта, а деформация растяжения – при минимальной температуре цикла. Такой вид нагружения реализуется лишь в поверхностных слоях деталей, где знакопеременность нагрузок находится в максимальном диапазоне. Температурный цикл эксплуатации материала, согласно данным полученным с ОАО "Буньковский экспериментальный завод" (Московская обл.) и ЗАО "Символ" (Владимирская обл.), представлен на рис. 7.

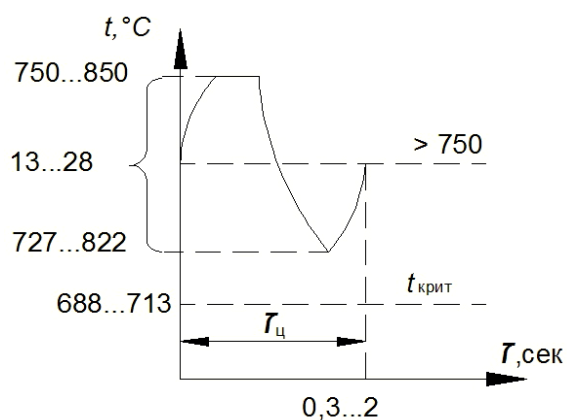


Рис. 7. Схема термического нагружения детали стеклоформы при нестационарном тепловом воздействии:
 t – температура эксплуатации; $\tau_{ц}$ – продолжительность цикла; $t_{крит}$ – критическая температура эксплуатации;
 τ – время эксплуатации

В различных условиях термический цикл эксплуатации деталей стеклоформ в отдельных узлах (горловина, поддон) имеет различные низкочастотные "отклонения" переменного знака ввиду накопления дефектов сплошности материала, формирования микрокапель стекла (величиной 0,01...0,05 мм) на формообразующих поверхностях и последующее их удаление следующим заполнением полости формового комплекта

стеклом. Однако упрощенная схема температурного цикла во времени будет соответствовать рис. 7: подача стекломассы на рабочие поверхности стеклоформы (подъем температуры поверхности детали), кристаллизация (формование) стекла (выдержка), открытие формового комплекта и извлечение стеклянного изделия (резкое падение температуры поверхности детали), закрытие формового комплекта и ожидание следующего цикла (незначительный подъем температуры).

Критическая температура ($t_{\text{крит}}$) – температура эксплуатации материала, от которой зависит степень формования стекломассы и качество получаемого стеклянного изделия. Например, при контакте натриевокальциевосиликатной стекломассы с формой в течение 0,8 с критическая температура составляет $\sim 713^\circ\text{C}$, с увеличением же времени контакта до 1,2 с критическая температура понижается до $\sim 688^\circ\text{C}$. Однако, в связи с применением на ведущих стеклотарных заводах – ЗАО "Балахнинское стекло" (Нижегородская обл.), ООО "Красное Эхо" (Владимирская обл.), ОАО "Гусевский стекольный завод им. Ф.Э. Дзержинского" (Владимирская обл.) – высокопроизводительных стеклоформирующих машин с временем контакта стекломассы с формой в течение 0,3...0,6 с, критическая температура эксплуатации чернового формового комплекта не опускается ниже 727°C . При этом в зависимости от продолжительности термического цикла (0,3...2 с) в процессе эксплуатации материала на поверхности формового комплекта наблюдается перепад температур в $13...28^\circ\text{C}$.

Обозначенная высокая цикличность во времени приводит к повреждаемости материала, то есть к процессу необратимых изменений, протекающих в материале под действием напряжений в условиях высоких температур. В деталях стеклоформ этот процесс проявляется под действием двух механизмов: протеканием структурных трансформаций (изменение фазового состава, охрупчивание поверхностных слоев, деформация по границам зерен, сдвиговые зерновые процессы, субмикроскопические разрывы и пр.) и изменением состояния поверхности изделия (окисление, образование задиров стекломассы, выкрашивание структурных компонентов и т.д.). При этом градация всех вышеперечисленных изменений в теле детали позволяет установить, что существенным фактором в формировании повреждений в стеклоформе является действие циклического термического нагружения, обусловленного именно неравномерностью температур в нестационарном температурном режиме работы. Это говорит о том, что материал деталей стеклоформ должен обладать одновременно высоким коэффициентом теплопроводности (для поддержания температурного цикла эксплуатации и интенсификации процесса отвода тепла от рабочих поверхностей) и повышенным сопротивлением к термоусталостному разрушению.

Такое заключение позволяет сделать вывод, что с точки зрения структуризации материала первым показателем, определяющим стойкость деталей стеклоформ, является микроструктура чугуна на глубине 5...10 мм, которая соответствует зоне рабочего слоя формы после механической обработки (в отливке – до 15 мм). Необходимо получение на рабочей поверхности стеклоформ очень мелкого и однородного графита с целью

улучшения обрабатываемости, полировки поверхности, повышения трещиностойкости, а также снижения вероятности выкрашивания графитовых включений с поверхностей металлических форм при циклическом воздействии высоких температур.

Другим показателем, определяющим теплопроводность и отсутствие коробления форм, является микроструктура чугуна на глубине 15...40 мм. Основным требованием, предъявляемым к структуре слоев на таких глубинах в отливках для деталей стеклоформ, является наличие крупных включений пластинчатого и/или вермикулярного (в некоторых случаях шаровидного) графита, обеспечивающих высокую теплопроводность (более 40 Вт/м·град) и, соответственно, понижение термических напряжений в эксплуатируемых деталях (идеальный вариант предполагает формирование графита ориентированного параллельно плоскости базиса). Теплопроводность чугуна можно повысить также путем увеличения количества феррита в металлической матрице чугуна, что обуславливает применение на глубине 15...40 мм для деталей такого типа именно ферритного чугуна с вермикулярным графитом, ориентированным преимущественно в направлении теплоотвода.

Третьим показателем, определяющим прочностные и теплофизические свойства детали и оказывающим существенное влияние на стойкость формовых комплектов, является микроструктура чугуна на глубине более 40 мм, а также высокотемпературная аберрация структурных включений в процессе роста числа теплосмен. Помимо этого интенсифицируется процесс сегрегации высокоуглеродистой фазы в этом пограничном слое. Формирование данных процессов способствует созданию "промежуточных структур", влияние которых обусловлено выделением графита эвтектики "железо–графит", коалесценцией выделившегося графита к сферолизитам граничного слоя и трансформацией цементитной фазы. Это может быть связано с тем, что удельный объем цементита несравнимо меньше удельного объема продуктов его распада ($3,2 \rightarrow 26,6 \text{ см}^3$) в перерасчете на объем одной грамм-молекулы. То есть структура чугуна должна обладать эксплуатационной стабильностью в процессе термоциклирования, иметь минимальные структурные превращения без искажения заданного структурного соответствия.

Заключение

Добиться повышенной эксплуатационной стойкости стеклоформирующей оснастки и соответственно высоких показателей термостойкости и прочности чугуна становится возможным, если сформировать в пределах рабочего слоя заготовки (5...15 мм) зону со структурой феррит+шаровидный графит; окалиностойкости – путем легирования металлической основы чугуна элементами с высоким антикоррозионным потенциалом; ростоустойчивости и теплопроводности – за счет комплексного воздействия легирующих компонентов чугуна и формирования бездефектной слоистой структуры – легированный феррит+шаровидный графит и легированный феррит+пластинчатый графит.

Высокие эксплуатационные показатели деталей стеклоформ можно получить без упрочнения рабочих кромок, если обеспечить формирование послойной структуры литых заготовок с определенным комплексом свойств за счет:

- легирования расплава элементами, оказывающими влияние на фазовый состав чугуна;
- модифицирования расплава чугуна для глобуляризации графитовых включений;
- направленного структурообразования заготовок, определяемого влиянием технологических приемов заливки и затвердевания чугуна.

Список литературы

1. Леушин И.О., Чистяков Д.Г. Анализ процессов трещинообразования в деталях чугунных стеклоформ // Металлы. 2014. № 5. С. 101-105.
2. Леушин И.О., Чистяков Д.Г. Исследование структурно-морфологических состояний графита на примере чугунных отливок стеклоформ // Литейщик России. 2014. № 9. С. 35-39.
3. Тополянский П.А. Увеличение срока службы формокомплектов в условиях стеклотарных заводов // Стеклоформ. 2009. № 3. С. 14-18.
4. Шлегель А.Н. Повышение стойкости рабочих кромок чугунных стеклоформ на основе лазерного непрерывного упрочнения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 20 с.
5. Барчуков Д.А., Лаврентьев А.Ю., Мельников И.В. Выбор чугуна для изготовления стеклоформ // Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр. по итогам международной научно-технической конференции. Вып. 13. Брянск: БГИТА, 2011. С. 3-6.

Influence of Cast Iron Structure on the Glass-mold Equipment Operational Defects

I.O. Leushin¹, D.G. Chistyakov^{1,*}, V.A. Volodin²

[*91_liza@mail.ru](mailto:91_liza@mail.ru)

¹Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russia

²JSC "Normal", Nizhny Novgorod, Russia

Keywords: cast iron, glass forming equipment, structure

The growing demand for glass packaging contributes to the increase in production capacity of glass-container plants. Their equipment (cast iron glass-forming sets) operates in continuous mode under complex cyclic thermal loads, which lead to the formation of operational defects on the working surfaces of details: graphite falling, cracks, oxidation, etc. Particular influence on the formation of these defects renders the microstructure of the material at the time of installation of details on the line.

The article identifies the causes for formation of operational defects, formulates the ways to remedy them and prevent their occurrence.

The authors studied details made from grey cast iron with flake and spherical forms of graphite. It is found that in the process of exploitation of the material is greatly reducing its hardness, strength, resistance to oxidation through of graphitization processes, chemical interaction of glass and iron, shock loads working edges. It is proved that the choice of initial microstructure of cast iron (the metal base, the graphite form, the presence of structural-free cementite) exercises a determining influence on the durability of the mold tooling. The article proposes differential (layered) arrangement of the graphite phase of cast iron in the alloy matrix (ferrite). This arrangement of high-carbon phase can simultaneously increase the thermal and oxidation resistance of the material. The formation of a layered structure of iron is produced by the intensification of the processes of alloying, modifying and directional freezing the melt.

These data can be used to select the material of details by manufacturers glass-molds tooling.

References

1. Leushin I.O., Chistyakov D.G. Analysis of cracking in glass molds made of cast iron. *Metally*, 2014, no. 5, p. 101-105. (English version of journal: *Russian Metallurgy (Metally)*, 2014, vol. 2014, iss. 9, pp. 768-771. DOI: [10.1134/S0036029514090110](https://doi.org/10.1134/S0036029514090110)).

2. Leushin I.O., Chistyakov D.G. Research of structural-morphological condition of graphite on the example of iron castings glass-molds. *Liteishchik Rossii*, 2014, no. 9, pp. 35-39. (in Russian).
3. Topolyanskii P.A. Increased service life of pressure molds in the conditions of glass plants. *Steklyannaya tara*, 2009, no. 3, pp. 14-18. (in Russian).
4. Shlegel' A.N. *Povyshenie stoikosti rabochikh kromok chugunnykh stekloform na osnove lazernogo nepreryvnogo uprochneniya. Avtoref. kand. diss.* [Increasing resistance of working edges of cast-iron glass molds on the basis of a continuous laser hardening. Abstract of cand. diss]. Moscow, 2011. 20 p. (in Russian).
5. Barchukov D.A., Lavrent'ev A.Yu., Mel'nikov I.V. The choice of iron for the manufacture of glass molds. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii: sb. nauch. tr. po itogam mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Vyp. 13* [New materials and technologies in mechanical engineering: collection of scientific papers according to the results of international scientific-technical conference. Iss. 13]. Bryansk, BSETA Publ., 2011, pp. 3-6. (in Russian).