

УДК 621.746.019

И.О. Леушин¹, Д.Г. Чистяков¹, С.Н. Марфенин²**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ
ЧУГУННЫХ СТЕКЛОФОРМ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО «Нижегородский НИИ машиностроительных материалов "Прометей"»²

Рассматривается процесс изготовления деталей стеклоформ, применяемых для массового выпуска стеклянных изделия. Предлагается применять способ получения литых заготовок с градиентным расположением структурных составляющих чугуна. Склонность материала детали к изменению своей структуры в процессе эксплуатации предлагается определять методом измерения электрического сопротивления.

Ключевые слова: чугун, стеклоформа, отливка, термостойкость, электросопротивление.

Введение

С повышением скоростных режимов рабочих процессов стекловыдувных автоматов при производства в массовом порядке полый стеклянной тары (бутылки, флаконы и пр.) интенсифицируется процесс теплопередачи энергии через детали формовых комплектов, что создает повышенную теплонапряженность в материале формблока. Этому способствует комплексное воздействие мощного теплового потока и механических нагрузок на рабочие¹ стенки деталей, что формирует ключевые свойства, которыми должны обладать детали такого типа, – высокие термо- и жаростойкость материала при достаточной прочности конструкции и механических показателей ее изготовления.

Общеизвестно, что разрушению от знакопеременных термоциклических нагрузок (термической усталости) подвергаются лишь те детали, что подвержены незначительной дополнительной механической нагрузке. Однако процесс изготовления стеклянной тары имеет присущие ему особенности, значительно отличающие его от общеизвестных механизмов термоциклирования деталей, которые изучены в большей степени (кокиля, изложницы, детали газотурбинных установок и пр.). Главным отличием эксплуатации деталей стеклоформ является большая цикличность процесса во времени с использованием принципа двойного выдувания стеклоизделия (рис.1) и, соответственно, применением двух стеклоформирующих комплектов различной конфигурации (черновой и чистовой металлических форм).

Периодичность подачи капли расплавленной стекломассы (как правило, заостренной у кромки) в стеклоформирующую машину (в черновую форму, охлаждаемую воздухом) составляет 30-150 шт/мин в зависимости от ее производительности. Температура расплавленного стекла в момент попадания в стеклоавтомат достигает 1100-1250°C. Время выдувания стекломассы в черновой форме (рис. 2, а) составляет 1.2-3 с, подача сжатого воздуха для прессования горловой части стеклоизделия осуществляется, как правило, через 0.3-0.7 с, а выдувание пульки (стеклоизделия предварительной конфигурации) – через 1.0-1.5 с после попадания стекломассы в черновую форму. При этом время выдувания обычно не превышает 3 с, а время нахождения пульки на межоперационном этапе "черновая→чистовая формы" – 1 с. Выдержка стеклоизделия на так называемом, "поддоне охлаждения" составляет 1.8-4.0 с. Таким образом, общая продолжительность процесса "стекломасса→готовое стеклоизделие" не превышает 8-15 с, при прогреве рабочих поверхностей деталей черновых стеклоформ до температур 750-850°C. Такой термоциклический режим эксплуатации приводит к высокой термической усталости материала форм, под действием которой происходит повреждение внутренних поверхностей и деталь выводится из цикла.

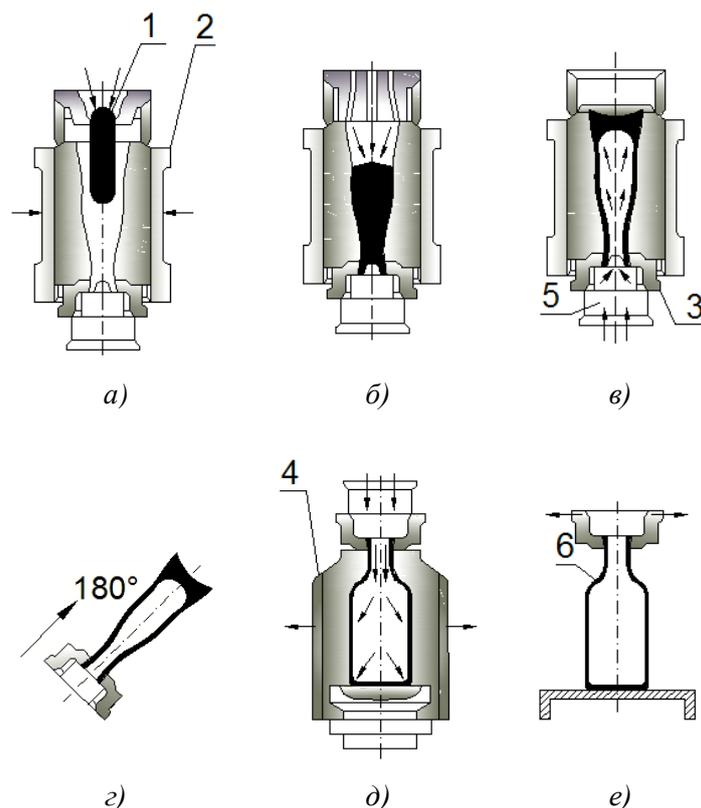


Рис. 1. Процесс изготовления стеклоизделия:

a – попадание капли в черновую форму; *б* – формирование горловой части стеклоизделия; *в* – выдувание предварительного стеклоизделия (пульки) в черновой форме; *г* – кантование пульки в чистовую форму; *д* – выдувание готового стеклоизделия в чистовой форме; *е* – выдача готового изделия на конвейер; 1 – расплавленное стекло; 2 – черновая форма; 3 – горловая форма; 4 – чистовая форма; 5 – дутьевая головка; 6 – готовое стеклоизделие

Помимо характерных тепловых потоков большой мощности через конструкции стеклоформирующих элементов детали испытывают воздействие механических нагрузок со стороны расплавленного стекла (для черновой формы) или пульки (для чистовой формы) – компрессионное давление в процессе выдувания пульки стеклоизделия может достигать 2.5-3 атм. [1].

Общая тенденция производителей стеклоизделий в снижении металлоемкости деталей стеклоформ при увеличении производительности работы оборудования способствует повышению как местной напряженности в ее отдельных узлах, так и общей напряженности стеклоформирующей конструкции в целом. Особенно это проявляется в нестационарности температурного и силового нагружений, определяющих циклический режим упругопластического деформирования материала и, как следствие, неизотермические условия эксплуатации.

Анализ термонапряженного состояния деталей стеклоформ в процессе их работы показал, что наиболее нагруженным, как с точки зрения термического, так и с точки зрения силового воздействия, является горловая часть черновой формы (рис. 2, б), что проявляется, в первую очередь, в повреждении ее поверхностных слоев. Высокое термомеханическое воздействие на горловую часть объясняется значительной скоростью попадания капли стекла в форму (под действием сил гравитации), ударом стекломассы о поверхность и наибольшим компрессионным давлением в момент выдувания пульки в черновой форме при тепловом ударе, достигающем $250^{\circ}\text{C}/\text{с}\times\text{мм}$. Градиент температур по сечению детали при этом составляет $450\text{-}620^{\circ}\text{C}$: внутренняя поверхность нагревается до $750\text{-}850^{\circ}\text{C}$, наружная $230\text{-}300^{\circ}\text{C}$.

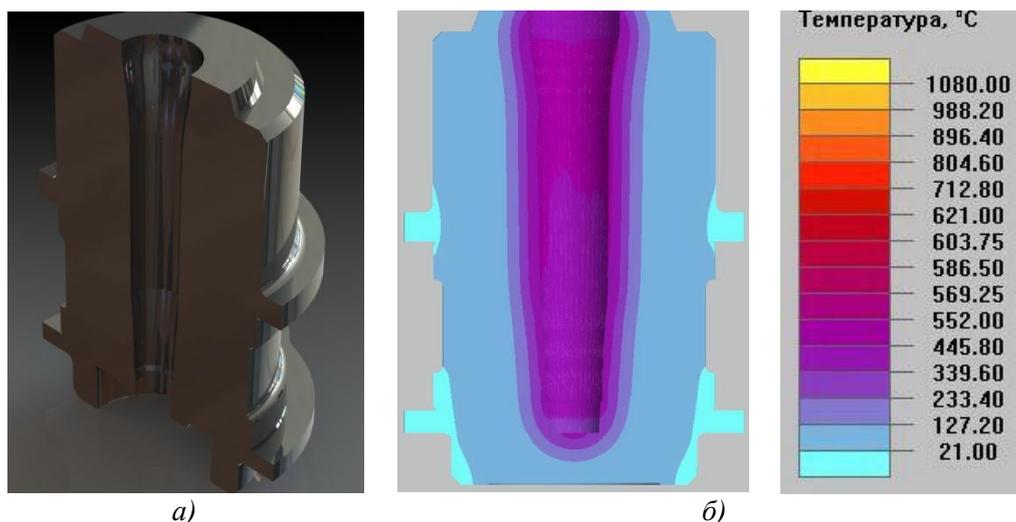


Рис.2. Стеклоформирующая оснастка:

а – деталь черновой формы; *б* – градиент разогрева черновой формы при эксплуатации

Таким образом, основными факторами, формирующими повреждения в рабочих поверхностях деталей стеклоформ, являются: механическая и тепловая усталость материала изделия в нестационарном температурном поле, циклический характер воздействия, высокая температура, высокий градиент температур, относительно высокая частота нагружения.

Постановка задачи

Для оценки, расчета и прогнозирования термоусталостного состояния деталей стеклоформ необходимо иметь данные о тепловом нагружении. Важной с этой точки зрения является кинетика термомеханических нагружений, которая показала, что, во-первых, нагрузка на отдельные ответственные узлы детали в течение ее эксплуатации происходит равномерно и в циклическом режиме и, во-вторых, по объему стеклоформы создаются зоны с разными знаками напряжений при устоявшейся высокой температуре ее рабочей поверхности.

Анализ расчетных данных моделирования эксплуатации стеклоформирующего комплекта проведенный в программных комплексах ANSYS и Solidworks Premium, представлен на рис. 3.

Ключевым свойством, определяющим стабильность работы деталей стеклоформ, является их термостойкость. По мнению авторов, термостойкость деталей стеклоформ – это способность деталей (в особенности ее рабочих поверхностей) противостоять совместному воздействию абразивного и термоциклического износов без нарушения сплошности ее контактных поверхностей. Таким образом, термостойкость деталей стеклоформ будет определяться, во-первых, склонностью структуры детали к формированию трещин разгара (наличием большого числа концентраторов напряжений и/или невысокой степенью сопротивляемости самой структуры к возникновению пластических деформаций), во-вторых, способностью быстрого отвода излишек тепловой энергии с рабочих поверхностей во избежание формирования высоких энергий диссипации, способных нарушить установленное структурное соответствие в полученной детали.

Все перечисленное позволяет заключить, что рабочий слой изделия должен иметь высокий запас вязкости разрушения (коэффициент трещиностойкости), а основная масса детали – обладать повышенной теплопроводностью.

В большинстве исследовательских работ и имеющихся на данный момент технологий изготовления деталей стеклоформ на предприятиях учитывается один из приведенных принципов и, как правило, не берется во внимание другой. Именно поэтому в настоящее время наибольшую популярность в качестве материала для черновых (а в 50% случаев и для чистовых) формовых комплектов применяется низко-, средне-, реже высоколегированный серый

чугун. Главными критериями выбора производителями этого материала являются: относительно невысокая стоимость его изготовления (хотя выгодность его получения относительно экономнолегированного высокопрочного чугуна с точки зрения экономической эффективности для конкретных производителей остается под большим вопросом) и высокая теплопроводность материала детали.

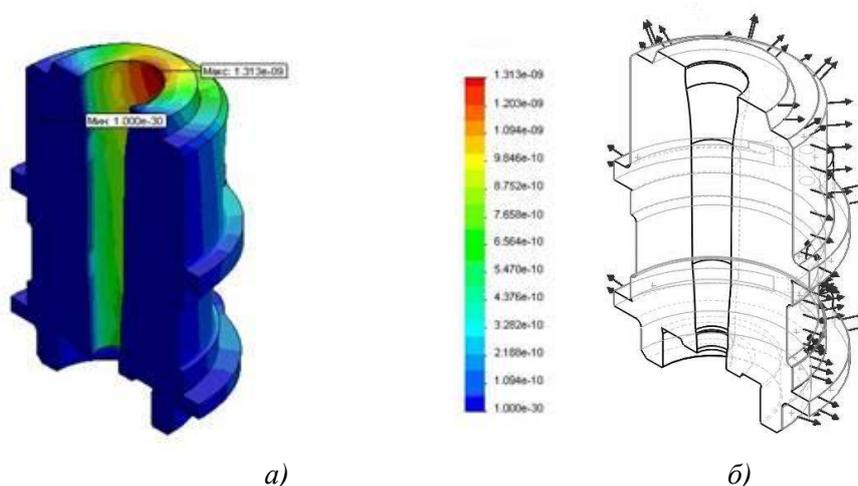


Рис. 3. Схема напряженного состояния детали стеклоформы:
а – рост пластической деформации относительно зон крепления;
б – направления роста детали под действием высоких температур

Часть заводов-изготовителей деталей стеклоформ применяют чугун с вермикулярной формой графита, с целью найти компромисс в решении проблемы повышения стойкости стеклоформ на производственной линии – термостойкость увеличивается, а теплопроводность падает (но до допустимой величины, позволяющей быстро отвести избытки энергии с рабочих поверхностей; как только эта величина становится ниже пороговой, стойкость стеклоформ резко падает).

Большинство деталей стеклоформ западных производителей ("Nuove Officine Valtaro", Италия; "ZITZMANN", Германия; "Инхом-98", Болгария [2]) имеют структуру либо серого чугуна (как правило, для черновых формокомплектов), либо чугуна с вермикулярным графитом (как правило, для чистовых формокомплектов). При этом за счет использования сложнокомпонентных лигатур и модификаторов, уникальных технологии заливки расплава и кристаллизации отливок западные образцы стеклоформ значительно превосходят отечественные (нередко в 2-4 раза) по количеству выдерживаемых температурных смен.

Авторами установлено, что на данный момент не существует какой-либо универсальной технологии изготовления деталей стеклоформ. При этом наиболее современные способы повышения прочности и надежности конструкции стеклоформирующих комплектов (точечная закалка, лазерное упрочнение и т.п.) не обеспечивают низкий уровень трансформации структурных компонентов чугуна под действием высоких температур, поэтому, по мнению авторов, особого внимания заслуживает процесс формирования структур, способных противостоять описанным механизмам повреждений деталей.

Термонапряженное состояние деталей стеклоформ при их эксплуатации

Согласно данным [3] увеличение содержания кремния в высокопрочных чугунах с шаровидным графитом способствует повышению устойчивости их структуры действиям циклического нагрева до температуры 900°C. Благоприятным действием такого легирования является получение стабильной структуры графит+кремнеферрит. Благодаря этому при дальнейшем термоциклировании исключаются процессы графитизации и связанные с ними

рост и окисление. В качестве конструкционного и функционального материала для деталей такого типа авторы предлагают использовать легированный кремнием до 4.5-5% чугун с градиентным расположением структурных составляющих (рис.4). Главным преимуществом использования такого чугуна является высокая прочность рабочих поверхностей при повышенной теплопроводности изделия (по сравнению с известными чугунами с шаровидным графитом). Особенности изготовления деталей данного типа подробно освещены авторами в работе [4].

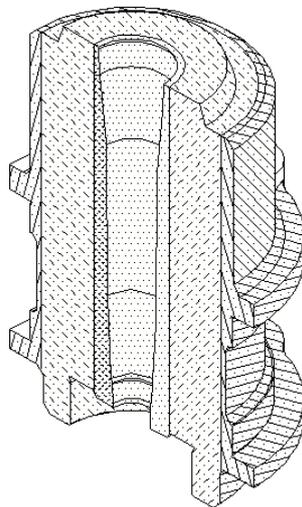


Рис. 4. Стеклоформа: схема расположения структурных составляющих:

-  – слой с шаровидной формой графита размером 10-20 мкм;
-  – слой с вермикулярной формой графита;
-  – слой с пластинчатой формой графита

Однако процесс теплопередачи излишек тепловой энергии через материал детали стеклоформы с градиентным расположением структурных составляющих в процессе ее эксплуатации несколько отличен от теплопередачи через материал с однородной структурой (рис. 5, а). Для оценки эффективности теплопередачи через деталь стеклоформы с градиентной структурой можно представить зону теплоотвода как многослойную стенку с нулевым зазором, состоящую из материалов с различными теплофизическими характеристиками. Поэтому теплопередачу через деталь с градиентным расположением структурных составляющих можно представить как:

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\Delta}{\frac{\delta_{ВЧ}}{\lambda_{ВЧ}} + \frac{\delta_{ЧВГ}}{\lambda_{ЧВГ}} + \frac{\delta_{СЧ}}{\lambda_{СЧ}}} = \frac{\delta_{ВЧ} + \delta_{ЧВГ} + \delta_{СЧ}}{\frac{\delta_{ВЧ}}{\lambda_{ВЧ}} + \frac{\delta_{ЧВГ}}{\lambda_{ЧВГ}} + \frac{\delta_{СЧ}}{\lambda_{СЧ}}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{экв}}$ - эквивалентный коэффициент теплопроводности, Вт/(м×К); Δ - толщина стенки детали стеклоформы, м; $\delta_{ВЧ}$, $\delta_{ЧВГ}$, $\delta_{СЧ}$ - толщины слоев, образованных чугунами с шаровидной, вермикулярной и пластинчатой формами графита, м; $\lambda_{ВЧ}$, $\lambda_{ЧВГ}$, $\lambda_{СЧ}$ - коэффициенты теплопроводностей чугунов с шаровидной, вермикулярной и пластинчатой формами графита, Вт/(м×К).

За один съем стеклянного изделия через все слои стеклоформы проходит одинаковое количество теплоты (q_x), поэтому q_x в отдельных слоях будет определяться как:

$$q_x = \frac{2\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad \text{для чугуна с шаровидным графитом}, \quad (2)$$

$$q_x = \frac{2\pi(t_2 - t_3)}{\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2}}, \text{ для чугуна с вермикулярным графитом,} \quad (3)$$

$$q_x = \frac{2\pi(t_3 - t_4)}{\frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3}}, \text{ для чугуна с пластинчатым графитом.} \quad (4)$$

Температурный (системный) напор в каждом слое будет выглядеть как:

$$\begin{cases} t_1 - t_2 = \frac{q_x}{2\pi} \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1}, \\ t_2 - t_3 = \frac{q_x}{2\pi} \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2}, \\ t_3 - t_4 = \frac{q_x}{2\pi} \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3}. \end{cases} \quad (5)$$

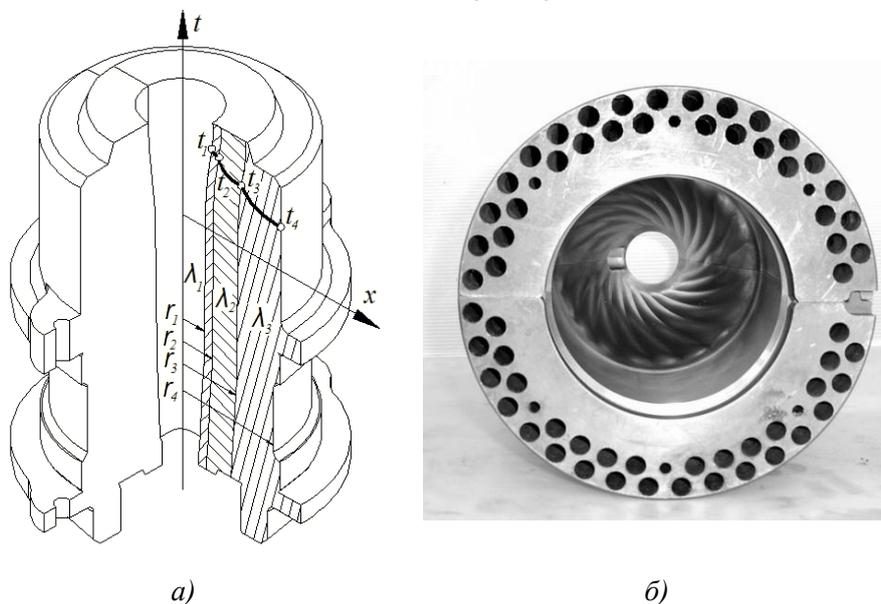


Рис. 5. Теплопередача через деталь стеклоформы с градиентной структурой:
a – схема теплоотвода; *б* – каналы воздушного охлаждения

Сумма температурных напоров в слоях с шаровидным, вермикулярным и пластинчатым графитом будет составлять полный температурный напор. Складывая отдельно левые и правые части системы уравнений имеем

$$t_1 - t_4 = \frac{q_x}{2\pi} \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3} \right). \quad (6)$$

Значение линейной плотности теплового потока q_x через деталь стеклоформы будет определяться из формулы (7), а значение температур в переходных областях "шаровидный-вермикулярный" (t_2) графит и "вермикулярный-пластинчатый" (t_3) будет определяться из системы уравнений (8).

$$q_x = \frac{2\pi(t_1 - t_4)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3}}. \quad (7)$$

$$\begin{cases} t_2 = t_1 - \frac{q_x}{2\pi \lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1}, \\ t_3 = t_1 - \frac{q_x}{2\pi \lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} = t_4 + \frac{q_x}{2\pi \lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3}. \end{cases} \quad (8)$$

Необходимая эквивалентная теплопроводность для деталей стеклоформ составляет не менее 40 Вт/(м×К) [7]. Суммарная теплопроводность детали стеклоформы с градиентным расположением графитовых включений меньше теплопроводности серого чугуна с пластинчатым графитом. Это объясняется большей разобщенностью включений шаровидного графита в рабочем слое и ростом размеров графитовых включений от внутреннего слоя к наружному. Согласно [5, 6] теплопроводность чугунов с различной формой графита значительно разнится (табл. 1).

Таблица 1
Теплопроводность чугунов при температуре 20°C

Теплопроводность, Вт/м×°С			
СЧ10	СЧ15	СЧ25	СЧ35
60	59	50	42
ЧВГ30	ЧВГ35	ЧВГ40	ЧВГ45
50	48	39	39
ВЧ40	ВЧ45	ВЧ50	ВЧ60
40	34	30	29

Ввиду того, что для различных масс заготовок стеклоформ (изменение номенклатуры выпускаемых стеклоизделий) структурный градиент будет иметь различную форму как шаровидного, так и пластинчатого графита, то авторы в качестве выбора коэффициентов теплопроводности материала ограничились средним значением по каждой форме графита.

После разогрева формового комплекта максимальный и минимальный температурные пики на внутренних кромках детали будут периодически повторяться (соблюдаться принцип изотермического циклирования). Соответственно, приняв максимальную температуру на внутренней поверхности равной 850°C, а минимальную на внешней – 250°C [7], имеем решение описанных уравнений:

$$q_x = \frac{2\pi(t_1 - t_4)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3}} = \frac{2 \times 3.14 \times (850 - 250)}{\frac{1}{33.25} \ln \frac{0.07}{0.04} + \frac{1}{44} \ln \frac{0.12}{0.07} + \frac{1}{52.75} \ln \frac{0.15}{0.12}} = 113116.9 \text{ Вт/м,}$$

$$t_2 = 850 - \frac{113116.9}{2 \times 3.14} \frac{1}{33.25} \ln \frac{0.07}{0.04} = 546.84^\circ\text{C}, \quad t_3 = 250 + \frac{113116.9}{2 \cdot 3.14} \frac{1}{52.75} \ln \frac{0.15}{0.12} = 326.2^\circ\text{C}.$$

Градиенты температур через слои детали будут составлять $\delta t_1 = t_1 - t_2 = 287.55^\circ\text{C}$, $\delta t_2 = t_2 - t_3 = 222.19^\circ\text{C}$ и $\delta t_3 = t_3 - t_4 = 80.26^\circ\text{C}$ для слоев с шаровидным, вермикулярным и пластинчатый графитом соответственно.

Эквивалентная теплопроводность $\lambda_{\text{экв}}$ составит 42.19 (>40) Вт/(м×К), что является достаточным для эффективного отвода излишек тепла с рабочих поверхностей. Однако на процесс теплоотвода, а соответственно и на формирование полученного градиента температур могут влиять следующие факторы:

- изменение массы формового комплекта, а соответственно и градиента температур;
- присутствие упрочняемой наплавки на рабочих кромках изделий (толщина которой значительно варьируется в зависимости от конфигурации внутренней полости и выбора стеклоформирующего автомата);
- наличие каналов для воздушного охлаждения (рис. 5, б) формы, что значительно уве-

личивает теплоотвод через внешний слой материала детали и снижает градиент температур в чугуне в зоне с пластинчатым графитом.

Так как условия образования термоусталостного разрушения детали стеклоформы определяются видом нагруженного состояния в зоне потенциального трещинообразования при термоциклическом нагружении [8], то на критические условия разрушения при неизотермическом нагружении существенно влияет знак циклической пластической деформации при максимальной температуре цикла. Таким образом, для деталей стеклоформ присуще сочетание температурного (нагрев↔охлаждение) и силового (удар стекломассы↔удаление стеклоизделия из формы) циклов: деформация сжатия осуществляется при максимальной температуре разогрева формокомплекта, а деформация растяжения – при минимальной температуре цикла. Такой вид нагружения реализуется лишь в поверхностных слоях, где знакопеременность нагрузок находится в максимальном диапазоне. Условный температурный цикл эксплуатации материала представлен на рис. 6, где $\tau_{\text{выд}}$ – продолжительность контакта расплавленного стекла со стенками формового комплекта, а $\tau_{\text{цикл}}$ – общее время цикла.

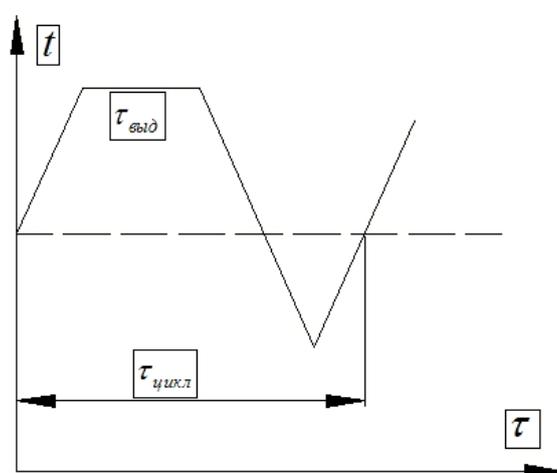


Рис. 6. Схема термического нагружения детали стеклоформы при нестационарном тепловом воздействии

Повреждаемость материала – это приводящий к разрушению процесс необратимых изменений, протекающих в материале под действием напряжений в условиях высоких температур [8]. 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 пр.). При этом градация всех перечисленных 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.

Измерение эксплуатационных характеристик деталей стеклоформ

В большинстве работ [8, 9] утверждается, что причиной выхода из строя деталей является термическая усталость их материала, в результате чего проводятся испытания образцов выбранного материала с варьируемой жесткостью нагружения, при этом сочетание термического и силового нагружения (стеснение термической деформации, высокая температура) приводит к формированию преимущественно деформаций сжатия. Из общих соображений вытекает, что чувствительность детали к трещинообразованию при циклических нагруз-

как определяется склонностью ее структурных компонентов к трансформации в процессе эксплуатации под действием переменных деформаций сжатий и растяжений. Очевидность этого явления подтверждается исследованиями отечественных и зарубежных ученых [10,11]. Наиболее оптимальным как с точки зрения точности измерения, так и с точки зрения адекватности получаемых результатов является измерение электрического сопротивления (Ω) в образцах (изготовленных из материала детали) до и после их термоциклирования, которое позволит оценить изменчивость структуры (передислокация зерен, коалесценция графитовых включений и пр.) на разных этапах эксплуатации формового комплекта. Природа изменения Ω в процессе эксплуатации деталей стеклоформ аналогична изменению теплопроводности материала с ростом температуры разогрева формового комплекта. Повышение Ω материала в процессе эксплуатации формовых комплектов, по мнению авторов, связано с: неизбежной трансформацией структурных компонентов, в особенности высокоуглеродистой фазы (например, изменением свойств графита – коэффициента линейного расширения, теплопроводности и т.п. – относительно его плоскости базиса); появлением окисных плен в местах скопления дефектов несплошности металла; повышенной адгезией расплавленного стекла и основного металла детали; проникновением атомов расплавленного стекла в поверхностные слои детали; появление в местах наибольшей дефектности изолирующих межкристаллических пленок и т.д. Все описанные процессы аналогичным образом влияют на эквивалентную теплопроводность детали, снижая ее термостойкость в целом.

С целью подтверждения данной теории авторы провели экспериментальные работы по изучению изменения Ω в материале детали стеклоформы в зависимости от уровня подвергнутой термической нагрузке при эксплуатации и "структурного состояния" исходных образцов. Ключевыми условиями проводимых экспериментов являлись:

- одинаковый темп тепловой нагрузки (один и тот же стеклоавтомат);
- одинаковые размеры образцов для измерения электросопротивления ($\varnothing 10 \times 25$ мм).

Образцы для измерения Ω вырезались из различных частей реальных деталей стеклоформ ввиду того, что литые образцы имеют ряд особенностей, не позволяющих подвергать их экспериментам [11]: тонкие поверхностные слои литых образцов (литейная корочка) не содержат графитовых включений, что оказывает существенное влияние на термоэлектродвижущую силу и искомое электросопротивление R ; точность размеров образцов после литья не соответствует выбранному эталону ($\varnothing 10 \times 25$ мм).

Изломы вырезанных образцов из детали с градиентной структурой для получения макрошлифов представлены на рис. 7.

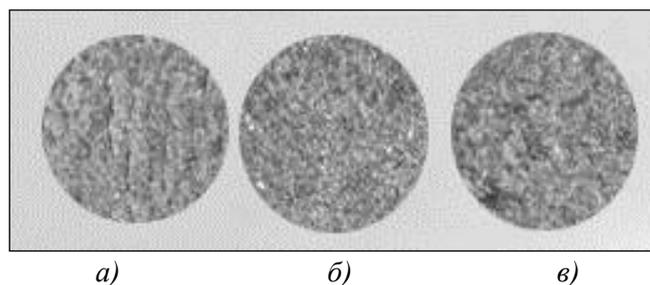


Рис. 7. Изломы вырезанных цилиндрических образцов из стеклоформы с градиентной структурой на глубинах:
a – 10 мм; *б* – 35 мм; *в* – 55 мм

В работе [9] автор предлагает для измерения Ω использовать принцип двойного моста, а для исключения влияния термоэлектродвижущей силы каждый образец (рис. 8, *a*) измерять при прямом и обратном направлении тока (рис. 8, *б*). В представленной схеме "равновесность" измерений достигается равенством устанавливаемых сопротивлений $R_1=R_3$ и $R_2=R_4$. При этом

$$R_x = R_N \frac{R_1}{R_2}, \quad (9)$$

где R_N – образцовое сопротивление и составная часть моста.

К измеряемому сопротивлению R_x присоединяются провода: 2 – продолжение цепи питания моста; 3, 4 – включаются последовательно с сопротивлениями R_1 и R_2 величиной больше 10 Ом, так что их влияние ограничено; 1 – составная часть моста. Во избежание ошибок и для предотвращения повреждений гальванометра (G) измерение Ω производят при уже установившемся токе в цепи.

С целью исключений влияния внешних факторов образцы подвергались повторному циклу измерений Ω на микроомметрах MMR-620 и БСЗ-010-2 (рис.8, в), принцип действия которых основан на измерении величины падения напряжения на измеряемом сопротивлении при прохождении через него оперативного тока заданной величины с измерением индуктивных сопротивлений с постоянной во времени не более 50 мс. Выбранный диапазон измерений составлял 10 нОм-10 кОм, предел допустимого значения погрешности измерения – менее 0.25%.

Таким образом, качественная оценка состояния детали при ее термоциклировании проводилась по анализу повреждаемости структуры материала (дробление зерен, изменение форм структурных составляющих, изменение упрочняющей и релаксирующей фаз) и ее поверхностных слоев (трещинообразование, окисление), количественная – по изменению Ω .

На основании этих данных осуществлялся принцип выбраковки деталей на производственной линии.

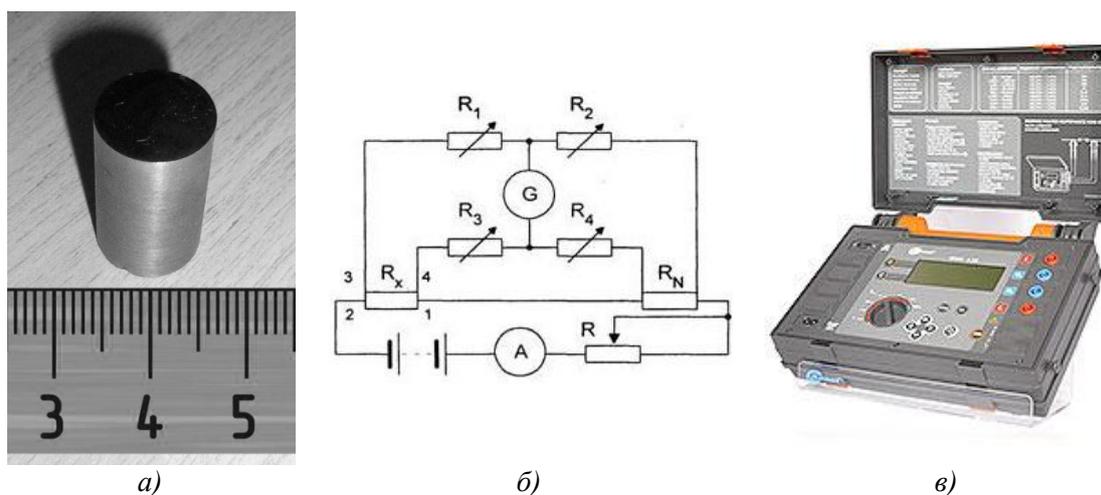


Рис. 8. Измерение электрического сопротивления:

а – образец для измерения сопротивления;

б – схема измерения по принципу двойного моста; *в* – измерительный прибор "MMR-620"

Согласно общеизвестным классическим теориям [12] сопротивление металла (как по падению теплопроводности, так и по снижению электропроводности) объясняется столкновением электронов с ионами кристаллической решетки. Градиент температуры (в случае деталей стеклоформ) создает различное электросопротивление в различных частях детали в процессе термоциклирования. В первую очередь это связано с процессом увеличения амплитуды колебаний ионов в узлах кристаллической решетки с повышением температуры. В связи с этим искомое сопротивление в детали стеклоформы будет определяться из формулы

$$R = R_0(1 + \alpha t) + R_d, \quad (10)$$

где R_0 – электросопротивление детали на момент ее установки на стеклоавтомат, Ом;

$\alpha = R \frac{dR}{dt}$ - температурный коэффициент сопротивления материала детали, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; t - температура разогрева детали на производственной линии, $^{\circ}\text{C}$; R_d - сопротивление дефектов изготовления (микротрещина; влияние примесей – внедрение в матрицу чугуна С, S и P; нарушение целостности кристаллической решетки и т.д.), Ом.

В результате измерений Ω в вырезанных образцах были получены данные о ходе структурных изменений в деталях при термоциклическом нагружении (табл. 2). Из результатов измерений видно, что при использовании СЧ в качестве материала для деталей стеклоформ наибольшую стойкость имеют детали с низким электросопротивлением Ω и с минимальным его приростом после термоциклирования материала (обр. 1, 2, табл. 2). В образцах из СЧ, легированных Cr, Ni, Ti, Mo и V (обр. 4, 5, табл. 2), наблюдалось аномальное снижение Ω во времени и повышение в связи с этим электро- и теплопроводности материала детали. Это объясняется эффектом легирования чугуна вышеперечисленными добавками (повышающие электропроводимость феррита, устраняющие формирование окисных плен и трансформирующие графитовые включения), что снижало положительные отзывы производителей при использовании такого материала при изготовлении деталей для черновых формокомплектов. Низкое Ω было обнаружено и в обр. 3, что проявило себя в значительной степени при эксплуатации – стойкость комплекта превысила 0.5 млн теплосмен. Однако применение такого материала для чистовых форм показало низкий уровень стойкости (0.2-0.35 млн циклов), ввиду появления трещин разгара на поверхности детали, что исключает перспективность его использования для деталей чистовых формокомплектов.

Таблица 2

Результаты

Образец	Материал образца	Число отстоявших теплосмен, тыс.	Измеренное электрическое сопротивление ² , 10^{-6} Ом			
			Принцип двойного моста		Прибор	
			До	После	До	После
1	СЧ	250	0.98	1.11	0.95	0.11
2	СЧ	300	0.96	1.03	0.93	0.99
3	СЧ	500	0.88	0.89	0.90	0.92
4	СЧ легированный Cr, Ni, Ti, Mo и V	350	0.93	0.92	0.93	0.89
5	СЧ легированный Cr, Ni, Ti, Mo и V	350	0.91	0.89	0.94	0.90
6	Перлит-ферритный ЧВГ	Нет данных	Нет данных	1.11	Нет данных	1.24
7	Перлит-ферритный ВЧ	350	1.19	1.54	1.12	1.41
8	ВЧ легированный Si (ферритный)	350	1.35	1.31	1.32	1.08
9	Перлит-ферритный ВЧ → ЧВГ легированный Cr, Ni, Ti, Mo и V	450	1.22	1.27	1.34	1.35
10	Ферритный чугун с градиентной структурой (ВЧ → ЧВГ → СЧ) легированный Si	>600	1.09	Нет данных	1.09	Нет данных

При применении в качестве материала для деталей стеклоформ перлит-ферритных ЧВГ и ВЧ (обр. 6, 7, 8, табл. 2), наибольший результат был достигнут при использовании их в качестве чистовых формокомплектов. В виду того что они обладают высоким запасом вяз-

² Разницу измерений микроомметрами и методом двойного моста можно объяснить разным переходным сопротивлением в областях контактов измеряемых образцов и клемм, а также разной величиной подаваемого оперативного тока через исследуемый образец.

кости материала (при наличии феррита) это оказывает положительный эффект на трещиностойкость чугуна под действием циклических теплосмен. Однако высокая степень изменчивости такой структуры (протекание графитизации и ферритизации, влекущие за собой резкое изменение Ω) в процессе эксплуатации не позволяет добиться высоких показателей стойкости формовых комплектов на линии.

Наибольшего ресурса эксплуатации деталей чистовых стеклоформ удалось добиться при использовании дифференцированного чугуна (ВЧ→ЧВГ) и чугуна с градиентным расположением графита (ВЧ→ЧВГ→СЧ), которые показали более высокие показатели стойкости и низкой трансформационной активности (изменение Ω) (обр. 9, 10, табл. 2).

Заключение

Анализ источников, освещающих механизмы термоциклического разрушения деталей, позволяет заключить, что природа образования повреждений в деталях стеклоформ при термоциклических нагрузках сложна и мало изучена, и до настоящего времени отсутствуют какие-либо прямые методы измерения, оценки и прогнозирования трещинообразования в материале детали, что позволяет лишь оценивать ее по показателям ресурсоспособности формовых комплектов на производственной линии в условиях конкретного стеклотарного завода. Применение простого в эксплуатации способа измерения электрического сопротивления материала позволяет оперативно оценить уровень нарушения исходного структурного соответствия в деталях стеклоформ, а также прогнозировать степень дальнейшего хода разрушения (скачкообразного сформированного изменения Ω).

Применение деталей стеклоформ с градиентной структурой литья позволяет обеспечить направленный теплоотвод в теле детали (повышение λ и снижение Ω от внутренних поверхностей к периферии), а также сформировать необходимый уровень прочностных показателей рабочих кромок.

Грамотный подход в освоении технологии изготовления отливок с градиентной структурой и контроль структурной трансформации (методом измерения электрического сопротивления) в изготовленных из них деталях позволяют добиться:

- существенного повышения ресурса эксплуатации формовых комплектов на линии – не менее чем в два раза по сравнению с общеизвестными – до 0.8 млн выдерживаемых термоциклов;
- своевременного обнаружения деталей с высокой степенью изменчивости исходного структурного соответствия с целью изъятия их с производственной линии к моменту допустимой ремонтпригодности.

На данный момент готовые детали стеклоформ с градиентной структурой литья эксплуатируются на стеклоавтоматах У8 (г. Можга, Республика Удмуртия).

Библиографический список

1. Информационный портал "НаукаКом". Все о стекле и не только [Электронный ресурс] / "НаукаКом". – Электрон. текстовые данные. – М.: [б.и.], 2013. – Режим доступа: <http://naukacom.ru/sovety-professionalov/dlya-vyduvaniya-izdelij-srednej-i-bolshoj-embkosti.html>.
2. Информационно-маркетинговый портал "Стеклоформа". Производители стеклоформирующей оснастки [Электронный ресурс] / "Стеклоформа". – Электрон. текстовые данные. – Киев: [б.и.], 2013. – Режимы доступа: <http://www.officinesl.com>, <http://www.zitzmann.com>, <http://www.inhom98.com>.
3. **Бобро, Ю.Г.** Легированные чугуны / Ю.Г. Бобро. – М.: Metallurgy, 1976. – 288 с.
4. **Чистяков, Д.Г.** Формирование градиентной структуры в деталях стеклоформ из чугунов с различной степенью глобуляризации графита / Д.Г. Чистяков, И.О. Леушин // Труды 10-й Международной научно-технической конференции "Современные металлические материалы и технологии" (СММТ'13). 2013. С. 253–254.
5. **Бабичев, А.П.** Физические величины: справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина,

- А.М. Братковский [и др.]; под ред. И.С. Григорьева и Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
6. **Герасимов, В.В.** Материалы ядерной техники: учебник для вузов / В.В. Герасимов, А.С. Монахов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1982. – 288 с.
 7. **Александров, М.В.** Формирование градиентной структуры в деталях стеклоформ из чугунов с различной морфологией графита / М.В. Александров, Д.Г. Чистяков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. №3(100). С. 219–229.
 8. **Туляков, Г.А.** Термическая усталость в теплоэнергетике / Г.А. Туляков. – М.: Машиностроение, 1978. – 199 с.
 9. **Дульнев, Р.А.** Термическая усталость металлов / Р.А. Дульнев, П.И. Котов. – М.: Машиностроение, 1980. – 200 с.
 10. **Федосов, А.И.** Оценка термостойкости серого чугуна по электросопротивлению / А.И. Федотов // Литейное производство. 1974. №1. С. 21–22.
 11. Hoff O., Andersen P. Some investigation on the surface layer of grey iron casting. 35 International congress foundry. Tokyo "Japan Foundrymens" Soc., 1968, 17/8.
 12. **Ковалёв, Н.Ф.** Физическая энциклопедия / Н.Ф. Ковалев, М.А. Миллер; под ред. А.М. Прохорова. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. Т. 5. – 760 с.

*Дата поступления
в редакцию 03.02.2014*

I.O. Leushin, D.G. Chistyakov

THE INCREASING OF OPERATIONAL STABILITY OF DETAILS GLASS-MOULDS BY IMPROVING OF TECHNOLOGY PRODUCTION AND CONTROL

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The specific challenges of premature failure of details glass-moulds used for the production of glass products in droves.

Approach: The way to improve thermal resistance of details glass-moulds is based on the theory of gradient location of the structural components of cast iron, which allows increase the durability of metal products and create high thermal conductivity.

Finding: The way of increasing the operational stability of details and method of control of key characteristics of the material.

The value of the study: This study improves resource use of metal products on the production line for the production of glass products.

Value: Application of the method of manufacturing of details with gradient structure allows to increase the operate resurs the forming complects and to reduce costs for expensive tooling, increases the reliability of the product as a whole.

Key words: cast iron, glass-mould, casting, heat resistance, electrical resistivity.