

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

И. М. Терещенко, А. П. Кравчук, Ю. Г. Павлюкевич

ТЕХНОЛОГИЯ СОРТОВОГО СТЕКЛА

*Допущено
Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия
для студентов учреждений высшего образования
по специальности «Химическая технология
неорганических веществ, материалов и изделий»*

Минск 2021

УДК 666.172.02/.05(075.8)
ББК 37.86я73
Т35

Р е ц е н з е н т ы :

кафедра лазерной техники и технологии Белорусского национального
технического университета (кандидат технических наук,
профессор кафедры *В. И. Шамкалович*);
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
промышленной безопасности ГУО «Университет гражданской
защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь» *В. А. Бирюк*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или ее части не может быть осуществлено без разрешения учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Терещенко, И. М.

Т35 Технология сортового стекла : учеб. пособие для студентов специальности «Химическая технология неорганических веществ, материалов и изделий» / И. М. Терещенко, А. П. Кравчук, Ю. Г. Павлюкевич. – Минск : БГТУ, 2021. – 151 с.
ISBN 978-985-530-939-1.

В учебном пособии отражен современный уровень технологических процессов, связанных с производством сортового стекла, в соответствии с основной концепцией дисциплины «Технология листового и полового стекла».

В издании рассмотрена эволюция сортового стекла от возникновения первых самостоятельных производств до наших дней. Приведены физические основы наиболее важных характеристик сортовых стекол – прозрачности и цветности. Детально изложены технологические стадии производства сортовых стекол, включая изделия из хрусталя, а также используемое оборудование для различных способов формования и получения стекломассы.

**УДК 666.172.02/.05(075.8)
ББК 35.115я73**

ISBN 978-985-530-939-1

© УО «Белорусский государственный
технологический университет», 2021
© Терещенко И. М., Кравчук А. П.,
Павлюкевич Ю. Г., 2021



ВВЕДЕНИЕ

Производство изделий из сортового стекла – чрезвычайно разнообразная подотрасль, выпускающая широкий спектр продукции с помощью различных процессов. Основной ассортимент продукции составляют многочисленные виды столовой посуды, посуды для приготовления пищи, а также декоративные изделия, включая изделия на ножке, чашки, тарелки, вазы и сувенирные предметы. Следует отметить, что изделия на ножке (бокалы, фужеры, рюмки) составляют более 50% объема производства.

Большая часть продукции производится из натрий-кальций-силикатного стекла, бесцветного и окрашенного. Свинцовый хрусталь и хрустальные стекла используются для производства изделий на ножке, графинов, ваз, сувенирных и художественных изделий. Глушеное (опаловое) стекло применяют для получения столовой посуды и частично посуды для приготовления пищи. Боросиликатные стекла находят применение для изготовления жаростойкой посуды.

В подотрасли используется малосерийное производство изделий из свинцового хрусталя, а также полностью высокомеханизированные линии для получения больших партий посуды из стекла. Находят применение практически все способы стекловарения, начиная от горшковых и заканчивая электрическими печами. Формование стеклоизделий может осуществляться ручными, полумеханизированными и механизированными способами, после чего они подвергаются термической, механической либо химической обработке. Например, на хрустальных изделиях, как правило, наносится алмазная грань, а затем их полируют.

Количество потребителей сектора, естественно, очень велико, но продажи осуществляются обычно торговым сетям, хотя часть продукции реализуется непосредственно потребителям через торговые дома, организуемые производителями.

Предприятия подотрасли подвержены воздействию широкого диапазона факторов, среди которых следует отметить вкусы потребителей и социальные тенденции. Чрезвычайно важно предугадывать,

опережать изменения вкусов, моды и реагировать на них соответствующим образом, так что гибкость, появление новых тенденций – важная часть производственных процессов. Другими словами, ассортимент продукции должен быть адаптирован под конкретные требования потребителей.

Механизация производства хрустальных изделий привела к появлению более дешевой продукции, по качеству близкой к таковой, обрабатываемой вручную. В то же время эта категория продукции особенно чувствительна к восприятию потребителей и существует спрос на изделия ручной выработки при большей цене за них.

Как и другие стекольные подотрасли, производство сортовых изделий в больших объемах является капиталоемким, требует значительных долговременных инвестиций. Это отражается в малой доле производителей, использующих печи с объемом производства более 20 т/сут. Подотрасль необычна тем, что растет доля малых предприятий, часто специализирующихся на конкретных нишах рынка либо на дорогих изделиях ручной выработки. Эта тенденция позволяет использовать недорогие малые печи, снижать уровень инвестиций, однако объемы производства сортового стекла в последние годы снижаются.

Следует отметить еще одну особенность: практически весь объем собственного стеклобоя (до 60% от объема сваренной стекломассы) используется вторично, а ограничения по качеству обычно не позволяют использовать вторичный стеклобой.



ГЛАВА 1 ИСТОРИЯ СОРТОВОГО СТЕКЛА

Результаты ряда археологических раскопок стоянок древних людей показывают, что стекло, в качестве материала, люди начали использовать во время верхнего палеолита, мезолита (среднего каменного века) примерно 34 000–7000 лет до н. э. Природные стекла для древних людей обладали ценным свойством – способностью раскалываться при ударном воздействии с образованием осколков с острыми и режущими краями. На стоянках древнего человека обнаруживаются находки осколков или орудий труда, изготовленных из природных стекол: тектитов¹ – стекло космического происхождения, и обсидианов² – стекло вулканического происхождения. На Филиппинах неподалеку от Манилы найдены мелкие орудия в виде треугольников, трапеций, сегментов и других форм, которые обрабатывались человеком и использовались в качестве наконечников, стрел, копий, амулетов и талисманов во время каменного века – 20–15 тыс. лет назад и позже. На стоянке палеолитических людей в Сатани-Дар (Армения) обнаружены самые древние в СНГ орудия из черного обсидиана: ручные рубила, скребла, ручные остроконечники, отщепы и пластины архаичной формы.

Работая с природными стеклами, древние люди были увлечены декоративно-эстетическими свойствами обсидианов. В Египте в додинастический период из них изготавливали изделия декоративно-художественного назначения: амулеты, бусы, скарабеи, глаза и зрачки для статуй и статуэток, вазочки и др. Отсутствие повсеместного распространения месторождений обсидианов, которые, например, доставлялись в Древний Египет, по-видимому, из Армении и (или) Абиссинии, а также сложность технологического процесса обработки природных стекол ограничивали их сферу применения и доступность для людей.

¹ От греч. *τηκτός* – сплавленный.

² Возможно происхождение названия от лат. *Obsidianus lapis* или лат. *Obsianus lapis* – камень Обсидия (или Обсия) от имени римлянина Обсидия (или Обсия), впервые привезшего камень в Рим из Эфиопии.

Существенно большие возможности и перспективы в области использования и изготовления разнообразных стеклянных изделий открылись перед людьми в результате возникновения стеклоделия. Известны две основные версии изобретения способа получения искусственного стекла. По одной из них, изложенной в труде Гая Плиния Старшего «Естественная история», стекло случайно получили финикийские купцы. Финикийский торговый корабль, попавший в бурю, стал на якорь в небольшой бухте. Моряки высадились на песчаный берег. Чтобы согреться и приготовить еду они развели костер и поставили котел на глыбы соды, которые принесли с корабля. На следующее утро в золе один из моряков заметил блестящие кусочки, которые и были стеклом.

Проведенная современными специалистами экспериментальная проверка показала, что температура пламени костра низка для варки стекла, поэтому история происхождения стекла, описанная Плинием, недостоверна.

Более вероятна другая версия, по которой получать стекла люди научились в процессе изготовления керамических изделий. По-видимому, гончар случайно перед обжигом нанес на поверхность керамического горшка смесь золы или соды с песком, которая впоследствии под действием высокой температуры сформировала тонкую стекловидную пленку – глазурь. Такие сосуды, покрытые глазурью, выгодно отличались от своих «сородичей», поскольку не пропускали хранящиеся в них жидкости.

Следующим шагом явилось возникновение самостоятельного стекольного производства. Данные раскопок показывают, что древнейшими стеклянными изделиями являются бусы. При раскопках Флиндерсом Петри близ г. Фив найдена светло-зеленая бусина 9×5,5 мм, возраст которой составляет около 5,5 тыс. лет. Другие стеклянные изделия египтяне научились изготавливать позже. Имеются находки, например палочки миллефиори³ с именем царя Амекемхета III (около 1830 г. до н. э.), древнейшей сортовой посуды – сосуда в виде маленькой кружечки того же времени и др. Ранее считалось, что впервые стеклоделие возникло в Египте. Несмотря на то, что большинство находок стеклянных изделий сделаны в Египте, сегодня имеются археологические свидетельства того, что способы изготовления различных стеклянных изделий были

³ С итал. *millefiori* – «тысяча цветов» – разновидность стекла, как правило, с цветочным узором.

известны жителям Месопотамии примерно в тот же период, что и египтянам, т. е. 5–6 тыс. лет назад, а возможно, и ранее. Некоторые немногочисленные археологические находки позволили предположить, что стеклоделие было известно жителям Древнего Китая и Древней Индии. Развитие стеклоделия в цивилизациях Древнего мира происходило преимущественно изолированно и периодически сопровождалось упадком

Ассортимент изделий, которые изготавливались стеклоделами Древнего Египта и Месопотамии, представлен бусами различной окраски, имитирующей драгоценные камни, предметы роскоши. С развитием техники стеклоделия примерно 3500–4000 лет назад научились изготавливать полые изделия (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Древние полые изделия

Наименование изделия, краткая характеристика (место изготовления)	Время изготовления
Стеклянная кружечка малого объема (Египет)	Около 1830 г. до н. э.
Сосуды для благовоний из синего непрозрачного стекла (Старовавилонское царство, Месопотамия)	Около 1600 г. до н. э.
Посуда из синего непрозрачного стекла (Египет)	Около 1580 г. до н. э.

Из-за неоднородности стекла, содержащего пузырьки и включения непроварившихся частиц, большинство древних стекол были непрозрачными. В редких случаях удавалось получать прозрачные стекла, например, в Месопотамии в районе Ашпупака найдена цилиндрическая печать из прозрачного стекла, датируемая временем династии Аккада, около 4,5 тыс. лет назад.

Составы древних стекол многокомпонентные, преимущественно относятся к натрий-кальций-силикатным, содержание оксида калия, как правило, не превышает 3 мас. %. В Древнем Египте реже встречались натрий-кальций-магний- или натрий-кальций-алюминий-силикатные стекла. В табл. 1.2 приведены пределы изменения содержания компонентов в составах стекол Древнего Египта и Месопотамии, определенные М. В. Безбородовым на основе данных различных авторов. В прил. 1 приведены некоторые составы древних стекол.

Древние стекла имеют отличия от современных и характеризуются повышенным содержанием оксида магния, алюминия и красящих примесей: оксидов железа, оксида марганца и др. Во многих стеклах отмечается высокое содержание оксидов щелочных металлов, особенно оксида Na_2O , которое превышает 20 мас. %.

Таблица 1.2

**Предельные значения содержания некоторых компонентов
в составах древних стекол**

Место находки (время получения стекла)	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Египет, Горуб Мединед, Тэль-эль-Амарна, Фивы (XV в. до н. э. – X в. н. э.)	50,90	3,80	2,03	22,66	0,41	0,65	0,41
	67,82	10,60	5,49	10,12	4,11	4,38	2,12
Месопотамия, Ассирио-Вавилония, (XV в. до н. э. – IX в. н. э.)	59,40	4,40	2,52	9,35	0,88	0,38	0,27
	71,54	9,09	5,59	17,37	3,18	2,58	2,15

Оксид свинца, обнаруживаемый в составе древних стекол в небольших количествах, по-видимому, скорее всего не вводился целенаправленно и являлся примесным.

Для приготовления шихты в странах Древнего мира использовалось преимущественно местное природное сырье, например, в Древнем Египте составляли шихту из песка, содержащего значительное количество оксида кальция, и соды, которая добывалась из высохших озер Вади Натрун (приблизительно 150 км на запад от Каира). Как и в Средневековье, в качестве доступного щелочесодержащего сырья применяли золу растений. Так, в Ниневии найдены 13 глиняных клинописных ассирийских табличек с рецептами шихты, записанных при царе Ашшурбанпале (669 – около 627 г. до н. э.). Один из расшифрованных рецептов шихты для варки близкого по составу к современному стеклу древнего ассирийского стекла, называвшегося «сирсу», включал: примерно 60 ч. песка, 180 ч. щелочей из «саликорнии»⁴, 5 ч. селитры и 2 ч. мела.

Древние стеклоделы владели технологическим процессом получения окрашенных стекол. Разнообразная окраска достигалась введением в состав стекол различных красителей: сурьмы, мышьяка, аурипигмента, вероятно, золота, металлургических шлаков, соединений, как правило, оксидов, марганца, железа, меди, кобальта, хорошо известных и в настоящее время. Изобретением древнеегипетских стеклоделов является применение «египетской сини»⁵ для придания изделиям синего цвета, близкого к цвету кобальтового стекла.

⁴ Под «саликорнией» подразумевается растение «солерос», в золе которого находилось около 14 мас. % карбоната натрия.

⁵ Минеральный краситель, представляющий собой тетрасиликат кальция и меди (CuO·CaO·4SiO₂), устойчив до температуры 1070°C.

С учетом сложности достижения высоких температур варка стекла проводилась в два этапа. Первоначально в плоских и широких тиглях в виде чаш спекали смесь сырьевых материалов. В дальнейшем после охлаждения отбирались остеклованные частицы, которые плавил в узких тиглях.

Существуют разные предположения, каким образом египтяне формовали стеклянные изделия. Уровень техники того периода не позволял достигать высоких температур варки, поэтому стекломасса получалась вязкой, что значительно затрудняло процесс формования. Сравнительно простые изделия, по-видимому, раскатывали и лепили из пластичной стекломассы. При формовании полых изделий древние стеклоделы вытягивали нить из стекломассы и навивали на сердечник, изготовленный из кварцевого песка. После чего сердечник разрушали и получали полое стеклоизделие.

Таким образом, несмотря на использование природных материалов, содержащих значительное количество примесных компонентов, несовершенство технологических процессов, в этот наиболее длительный период развития стеклоделия эмпирическим путем были выявлены составы окрашенных и преимущественно непрозрачных стекол, отработаны приемы их варки и формования стеклоизделий, в том числе и полых, которые в большинстве своем относились к предметам роскоши.

В Античный период был значительно расширен диапазон используемых составов окрашенных стекол, и, что особенно важно, научились получать прозрачные стекла, усовершенствовали конструкцию печей, что позволило повысить температуру варки и улучшить процесс осветления стекла, стали вводить стеклобой. Составы римских стекол, как и древнеегипетских, являлись преимущественно натрий-кальций-силикатными (прил. 2). Значения содержания некоторых компонентов в составах древнеримских стекол варьировались в следующих пределах (I–V вв. н. э.), мас. %: SiO_2 – 72,10–60,95; CaO – 9,21–3,04; MgO – 6,13–следы; Na_2O – 23,73–13,87; K_2O – 3,29–0,09; Al_2O_3 – 5,51–0,70; Fe_2O_3 – 1,68–0,27. Количество второстепенных стеклообразующих оксидов в сравнении с древнеегипетскими, ассииро-вавилонскими и индийскими стеклами было несколько ниже и составляло около 5,49 мас. %. Редко встречался, по-видимому, в качестве примеси оксид свинца. Из красителей применялись железо, марганец, кобальт, серебро. Для глушения использовался оксид олова. Античным стеклоделам удалось разработать рецептуры красных и розовых стекол,

из которых наиболее известным является стекло «гематион», окрашенное коллоидной медью. Розовое окрашивание достигалось путем введения золота в состав стекла.

Революционным изменением этого периода, которое позволило раскрыть потенциал стекла, как материала для изготовления сортовой посуды, является изобретение стеклодувной трубки. Начало широкого применения стеклодувной трубки относят к I в. до н. э., хотя, по-видимому, использовалась она намного раньше. Стеклодувная трубка позволила не только изготавливать стеклоизделия, отличающиеся сложностью и многообразием форм, обладающих высокими декоративно-эстетическими характеристиками, но и облегчила технологический процесс их получения, создав предпосылку для массового производства сравнительно простых изделий, которые стали доступны и необеспеченным слоям римского общества. Так, во время правления императора Нерона (54–68 гг. н. э.) стоимость простого стеклянного бокала составляла одну медную монету.

К Античному периоду относится значительное количество находок сосудов, предметов быта и сортовой посуды, обнаруженных при археологических раскопках. Сортные изделия, выпускавшиеся в римский период, весьма разнообразны. Небольшие питьевые сосуды на ножках и без них, с ручками или без ручек, диатреты⁶, стеклянные блюда, размеры которых могли достигать до одного метра, мелкие изделия: пуговицы, браслеты, кольца, бусы, подвески, печати, шахматные фигуры, игральные кости, разноцветные птички, которыми украшались прически женщин, гравированные камеи, миниатюрные мозаичные медальоны, имитации драгоценных камней – все это умели изготавливать римские стеклоделы. Возможности изготовления столь широкого ассортимента изделий были достигнуты, в том числе, и за счет получения накладных стекол, новых и усовершенствованных способов декорирования стеклоизделий: техники «миллефиори»⁷, с помощью которой украшали поверхность чаш; гравировки рельефных изображений

⁶ Сосуды с наружной стеклянной сеткой иногда довольно сложного узора, прикрепленной к сосуду на тонких стеклянных ножках.

⁷ Техника «миллефиори» заключается в изготовлении стеклянных разноцветных стволиков путем соединения в один пучок несколько разноцветных стеклянных палочек с последующим его растягиванием. В результате получается тонкий стеклянный стержень, состоящий из чередующихся слоев стекол разного цвета.

на стекле; вплавления в поверхность изделий накладных элементов из стекла в виде кружков, овалов, капель, звезд, розеток, пластинок с различными рельефными изображениями; шлифовки, резки по стеклу, вплавления золотой фольги между двумя слоями стекла и др. Одним из прекраснейших примеров достижений римских стеклоделов в технологии сортового стекла является «Портлендская ваза» (рис. 1.1).

После распада Римской империи в раннесредневековой Западной Европе наблюдается упадок стекольного производства, о чем свидетельствуют немногочисленные находки стекол, относящихся к VII–IX вв. Обобщающим трудом этого периода, в котором представлены техники раннесредневековых стеклоделов, в первую очередь немецких и французских, является «Трактат о различных ремеслах», который составлен ученым монахом-пресвитером Теофилом.

Ведущую роль в производстве стеклоизделий до XIII в. сохраняет Византия, которая, уступила в дальнейшем ее Венеции. Переселение византийских



Рис. 1.1. Портлендская ваза

ских стеклоделов после падения Константинополя (1204 г.) в Венецию способствовало интенсивному развитию в ней стекольного производства. С XIII в. центром производства венецианского стекла стал о. Мурано, на который перенесли мастерские, опасаясь пожара в самой Венеции. Ранние венецианские изделия середины XV в., дошедшие до нас, относятся к двум основным типам: стаканы, расширяющиеся кверху, и узкогорлые графины с шарообразным корпусом. В XVI в. венецианское стеклоделие характеризуется наивысшим расцветом, выпускаются бокалы в виде широкой чаши на узкой длинной ножке, зачастую украшенные декоративными элементами, сосуды причудливых форм в виде цветов, животных, птиц, гондол, колоколен. Венецианские мастера достигли

виртуозных высот в изготовлении тонкостенной окрашенной и бесцветной сортовой посуды, бисера, бус и других художественных стеклянных изделий, пользовавшихся широчайшей известностью. Наряду с широким ассортиментом большой популярностью венецианское стекло обязано своей высокой прозрачности и качеству изделий. Достижение высокого качества изделий венецианцами обеспечивалось использованием сырьевых материалов с низким содержанием красящих примесей, например кварцевого песка из французского леса Фонтенбло.

Наиболее известные разновидности венецианского стекла:

- цветное стекло, для производства которого используются оксиды;
- прозрачное бесцветное стекло;
- эмалированное и позолоченное стекло;
- филигранное стекло – бесцветное стекло, внутрь которого включены стеклянные нити (чаще всего белого цвета);
- молочное стекло: непрозрачное, молочного оттенка, полученное путем добавления в стеклянную массу окиси олова;
- агатовое стекло, имитирующее узоры агата;
- авантюриновое стекло, изобретенное муранскими мастерами в XVII веке;
- стекло, полученные с помощью техники миллефиори, например, представленное на рис. 1.2;
- кракелированное стекло, украшенное сеткой трещин, полученных при мгновенном охлаждении горячего стекла.



Рис. 1.2. Подвеска
в технике
миллефиори

Торговля стеклянными изделиями вносила существенный вклад в благосостояние Венецианской Республики, что позволило получить стеклоделам ряд привилегий. Однако, с другой стороны, правительство Венеции под страхом тюремного наказания и смертной казни запретило венецианским мастерам раскрывать секреты стекольного производства и покидать о. Мурано. Несмотря на это, привлеченные большими посулами, венецианцы неоднократно совершали побеги, распространяя свои знания в странах Европы и способствуя развитию в них стеклоделия.

Длительное время в Средневековой Европе главным конкурентом венецианского стекла было богемское, с течением времени в XVII в. Венеция начала сдавать свои позиции на рынке стекла и стеклянных изделий, что позволило чешским производителям быстро добиться общеевропейского доминирования и расширить производство. Одним из факторов, способствующих захвату чешскими мастерами пальмы первенства в стеклоделии, является изобретение ими техники гранения стекол. Начиная с XVI в. чешские мастера стали уделять особое внимание производству высококачественного прозрачного стекла. Успехов в этом направлении удалось добиться мастеру из Богемии Михаилу Мюллеру, который разработал рецептуру калиево-кальциевого стекла, отличающегося превосходным светопропусканием.

Многие европейские стеклоделы внесли неоценимый вклад в развитие производства сортовых изделий. Французские мастера нашли способ травления стекол (начало XII в.). Немецкий алхимик Иоганн Кункель во второй половине XVII в. переоткрыл способ получения «золотого рубина» и опубликовал книгу «Экспериментальное искусство стеклоделия».

Длительный период в истории стеклоделия предпринимались попытки получить стекло с высокой прозрачностью, блеском и белизной. Эта задача в полной мере была решена в Англии, в определенной степени случайно. В 1615 г. владельцы стекольных заводов были вынуждены использовать угольное топливо, поскольку английский король Якоб I ввел запрет на использование древесины в производстве, за исключением кораблестроения. Оказалось, что в угольных печах из-за коптящего пламени стекло приобретает желто-коричневый цвет. Для устранения этого эффекта стали использовать закрытые тигли, однако это привело к снижению в них температуры, стекла плохо проваривались.

В ходе поисков добавок, снижающих температуру варки, в 1676 г. Георгом Равенскрофтом была создана рецептура стекла, содержащего оксид свинца. Эта рецептура в последующем была доработана, а получаемое стекло благодаря своим высоким декоративно-эстетическим характеристикам, напоминающим горный хрусталь, получило название «хрусталь». В XVIII в. в Англии наряду с производством хрусталя также разработали технику декорирования хрустальных изделий – алмазную грань.

Очередной значимый этап развития производства сортовых изделий обусловлен промышленной революцией XVIII–XIX вв.

Появились новые типы печей: регенеративные, ваннные, электрические и усовершенствована их конструкция. В 1868 г. Ф. Сименс изобрел регенеративную стекловаренную печь, в 1870 г. предложил конструкцию ваннных печей непрерывного действия. Эти усовершенствования позволили повысить максимальную температуру в печи до 1550°C, сократить время варки стекломассы. Питатель с непрерывной подачей стекла был изобретен в 1903 г. Г. Бруком. В 1911 Г. Хониссом и Лоренцем запатентована система фидерного питания. Все это создавало предпосылки для механизации производства сортовых изделий.

Значительный шаг вперед был сделан в технологии формования сортовой посуды. Метод ручного выдувания, несмотря на его широкие возможности в области изготовления сортовой посуды сложных и разнообразных форм, ввиду своей трудоемкости, характеризовался низкой производительностью. В то время как потребность населения в дешевой стеклянной посуде непрерывно росла, что вынудило создать машинное производство, обеспечившее массовый выпуск дешевых стеклоизделий. В результате начато освоение машинных методов формования. Уже в середине XIX в. полые хрустальные изделия научились получать прессованием, появляется рычажный пресс. В 1890 г. во Франции для облегчения процесса выдувания стали применять сжатый воздух. Были механизированы многие технологические процессы в производстве сортовой посуды.

Однако попытки уйти от применения ручного труда в процессе выдувания стеклоизделий не увенчались полным успехом. По-прежнему производительность была невелика и качество получаемых сортовых изделий существенно уступало таковому, полученному методом ручного выдувания. В то время как для других полых изделий – стеклянной тары – проблема была решена. Теоретические основы методов прессовывдувания и выдувания были заложены еще в 1881 г. Ф. Арбогастом. В 1893 г. появляется первая машина с ручным приводом, изготовленная по его патенту. Существенным достижением в этой области являлась разработка Майклом Оуэнсом машины роторного типа с вакуумным питанием и специальным автоматическим насосом, способной производить 8 бутылок в минуту.

Безусловно, машинная выработка совершила коренной переворот в технологии сортовой посуды, однако в сравнении с другими областями стеклоделия: производством тары, листового стекла, стекловолокна, она, даже с внедрением достижений робототехники, по-прежнему полностью не вытеснила ручной труд. Причины этого

кроются в специфических особенностях производства сортовой посуды, которые заключаются в разнообразии ассортимента выпускаемых изделий, сложности их форм и размеров, что создает серьезные препятствия на пути его полной механизации и автоматизации.

Стеклоделие на территории, занимаемой восточными славянами, и в частности Беларуси, имеет давние корни. Как свидетельствуют археологические находки в Чаплинском городище (Гомельская обл.) бус и остатков посуды из Ольвии (крупнейший центр в Причерноморье), еще до нашей эры античные стеклянные изделия завозили на территорию Беларуси. Возникновение стеклоделия в Беларуси, по-видимому, следует отнести не позднее V в. При раскопках в поселке Обидня (Могилевская обл.) в большом количестве найдены тигли со стекломассой, которая использовалась в качестве красной эмали для бронзовых лунниц (славянский оберег для женщин в виде полумесяца). В значительном количестве обнаруживают бусы из красного и бордового глушеного стекла со слоями внутри золотой и серебряной фольги, включениями в виде разноцветных точек и полосок, а также другие стеклянные украшения местного стеклоделия на территории Беларуси, относящиеся к дохристианскому периоду.

Особенно бурно развивалось стеклоделие в период расцвета Киевской Руси и наряду с заимствованиями у других народов, в первую очередь византийцев, отличалось своими характерными особенностями.

Химический анализ древнерусских стекол домонгольского периода, выполненный советскими учеными, позволил выявить, что по составу они относятся к следующим группам (по М. В. Безбородову):

- многосвинцовые кремнеземные легкоплавкие. Использовались для изготовления смальт различных цветов для мозаик;
- калиево-свинцовые кремнеземные стекла прозрачные и глушеные, окрашенные в разные цвета. Из стекол этой наиболее многочисленной группы изготавливали бусы и браслеты;
- калиево-кальциево-кремнеземные применялись для изготовления почти бесцветной посуды и оконного стекла;
- натриево-свинцовые кремнеземные, по-видимому, не находили широкого использования, в основном варились для получения мозаики.

Задолго до изобретения хрусталя в Англии положительный эффект от введения оксида свинца в состав стекла был замечен еще в Древней Руси. Широко применялась древнерусскими стеклоделами и добавка оксида калия. Это подтверждают результаты химического анализа древнерусских стекол и данные археологических

раскопок. Например, в Киеве раскопаны остатки стекольной мастерской XI–XII вв., где были найдены разрушенные горны, куски смальты, обломки браслетов, разноцветных бус и перстней, небольшие тонкостенные бокалы, запас свинца. Около Галича в стекольной мастерской XI–XIII вв. также были обнаружены кусочки свинца. Например, один из рецептов древнерусской шихты для варки свинцово-кремнеземного стекла включал 1 объем песка и 1–2 объема оксида свинца, который получали в результате обжига кусочков свинца.

Для изготовления посуды наряду с натрий-кальций-силикатными стеклами древнерусские мастера применяли калиево-свинцовые кремнеземные (прил. 3). При археологических раскопах в Киеве, Вышгороде обнаружено значительное количество стеклянной посуды и ее фрагментов: доннышек стеклянных бокалов, обломков сосудов, небольших рюмок, тонкостенных желтых, голубых, синих и зеленых сосудов типа стопок, украшенных накладными полосками. Изготовление посуды производилось путем выдувания в форму, которая для создания декора могла иметь внутри узор. Украшали изделия накладом нагретых стеклянных украшений на горячее изделие. В трех крупнейших центрах Киевского государства: Гродно, Полоцке и Новогрудке, – также производили столовую и культовую посуду, многочисленные украшения из цветного, прозрачного и глушеного стекла.

Техника древнерусского стеклоделия в XI–XIII вв. достигла значительного расцвета, однако после монголо-татарского нашествия большинство стекольных мастерских на территории восточных славян было разрушено. Центр стеклоделия перемещается в белорусское Понемонье, в которое стекаются ремесленники из Волыни, Киева, Литвы и Польши. В феодальных вотчинах возникают небольшие стеклянные гуты, которые с течением времени трансформируются в крепостные мануфактуры. В XVII–XVIII вв. на территории Беларуси было создано 11 мануфактур. Наиболее известными были изделия Налибокской и Урицкой мануфактур, принадлежавших Радзивиллам. На них изготавливали стеклоизделия различного назначения, в том числе хрустальные сервизы, именные кубки и чаши из бесцветного и окрашенного стекла. Особенно знаменит кубок в честь Петра Первого, изготовленный Урицкой гутой. Для декора сортовой посуды: кубков, бокалов, штофов, – использовали техники алмазной грани и гравировки. На стеклоизделия наносили шуточные надписи, элементы белорусского орнамента и изображения бытовых сцен: охоты, дрессировки медведей. В результате разделов Речи Посполитой территории Беларуси вошли в состав

Российской империи, что обусловило активизацию стекольного производства и дальнейший его рост до начала Первой мировой войны. Одним из крупнейших предприятий по производству хрусталя и стеклянной посуды был завод графа Румянцева в Белицком повете. Крупными центрами становятся Телеханы, Новка, Глуша, Елизово, Поречье, Старьево, Ветрино, два Неманских завода. Особенно выделяется продукция Телеханского, Неманского, Старьевского и Борисовского заводов. В течение XIX–XX вв. белорусская стекольная промышленность движется в русле российской и общеевропейской традиции. Постепенно повышается качество и количество вырабатываемого стекла в результате внедрения машинной выработки, более совершенных методов обработки.

Развитие производства сортового стекла в Беларуси в XX–XXI вв. было очень неравномерным и чередовалось периодами резкого спада и подъема. Большая часть небольших стекольных предприятий в 1914–1920 гг. и 1941–1945 гг. была либо разрушена, либо пришла в упадок. К 1950 г. в БССР действовали два старейших стекольных предприятия, восстановленные в послевоенный период: стеклозавод «Неман» и Борисовский завод им. Ф. Э. Дзержинского, которые почти полностью переориентировались на выпуск сортовой посуды.

Борисовский хрустальный завод был основан в 1898 г. минским купцом Кабановым. Очень скоро завод получил широкую известность за пределами государства, его хрустальные изделия в 1917 г. на выставке в Париже впервые были удостоены медали. В послевоенные годы завод первоначально специализировался на выпуске изделий из бесцветного стекла, а в 1956 г. благодаря вводу новой шестигоршковой печи начался выпуск окрашенных стеклоизделий. В 1970 г. впервые в СССР на предприятии была освоена варка хрустального стекла в ванной печи, отапливаемой мазутом, и построен составной цех, в котором были полностью механизированы технологические процессы. Изделия предприятия отличались высоким качеством, что подтверждают полученные им престижные награды в Италии и Сербии, в Латвии и Украине, в Армении и Узбекистане. Продукция предприятия экспортировалась в 24 страны мира. Для удовлетворения заказов арабских фирм на Борисовском хрустальном заводе в начале 80-х создано крупнейшее в БССР производство экспортной продукции с объемом 20 млн шт. изделий в год. Несмотря на существенное сокращение объемов выпускаемой продукции в 90-х гг., ассортимент изготавливаемых сортовых изделий на заводе постоянно расширялся. В 1995 г. на предприятии

производилось около 700 наименований продукции из шлифованного свинцового хрусталя, цветного и бесцветного стекла. С 1998 по 2010 г. освоено более 2000 новых форм изделий, возобновлен выпуск эксклюзивных изделий – ваз из накладного стекла высотой более 1 м и массой до 30 кг. В связи с финансовыми трудностями, обусловленными в значительной степени сокращением спроса на сортовую посуду, в 2007 г. предприятие было переориентировано на выпуск медицинской тары и в 2020 г. принято решение о закрытии выпуска сортовых изделий.

Единственное функционирующее в Республике Беларусь на данный момент предприятие по производству сортовых изделий – стеклозавод «Неман», имеющий давние традиции. Основан завод в сентябре 1883 г. помещиком З. Ленским. Хрустальные изделия на предприятии начали изготавливать с 1893 г. В 1896 г. завод оснащается заграничным оборудованием, преимущественно немецким: шлифовальными станками, точильными восьмидельными машинами для шлифовки стаканов и другим оборудованием. Для варки стекломассы используют 12-горшковую печь со съемом стекломассы 4200 кг в сутки. В 1897 г. были построены еще одна 12- и одна 10-горшковая печи с общим съемом стекломассы 7700 кг/сут. Динамичное расширение производства сортовых изделий на предприятии было прервано первоначально Первой мировой и гражданской войнами, а затем и Второй мировой войной. В межвоенный период 20–30-х гг. XX в. стеклозавод «Неман» достиг высокого уровня технической оснащенности среди предприятий по производству сортовых изделий. Изделия этого периода характеризуются высоким художественным уровнем и разнообразным декором, что позволило предприятию стать крупным экспортером. В Неманском стекле отражались новые течения художественного стеклоделия Западной Европы того времени (конструктивизм, кубизм, функционализм) и одновременно сохранялись традиции стеклоделия конца XIX – начала XX в., когда органическими были влияния ампира и модерна.

После 1950 г. техническая оснащенность и производственные мощности предприятия, восстановленного после войны, возрастают, вводятся в эксплуатацию печи разных типов, в том числе: 8-горшковая (1956 г.), горшковая печь-спутник (1964 г.), ваннные печи для варки хрусталя и цветного стекла (1974 г.), электрическая печь для варки хрусталя и др. Доля ручного труда на предприятии неуклонно снижается. Проведена конвейеризация производства (1961–1962 гг.), активно внедряются новые машины для формования

обработки сортовой посуды: пневматические прессы, машины для заправки края изделия, отопки края, отколки колпачка; установки для химической полировки изделий из хрусталя, работающие в автоматическом режиме. Однако в период после распада СССР ввиду потери экономических связей и снижения потребности в посуде из бесцветного натрий-кальций-силикатного стекла и хрусталя, физического и морального устаревания выведена из эксплуатации большая часть производственных мощностей. К 2020 г. объемы производства сортовой посуды значительно уменьшены, из 16 ранее используемых стекловаренных печей работают только две. Предприятие выпускает изделия из хрусталя, бесцветного и цветного стекла со всевозможными видами декорирования, изделия для сервировки домашнего стола, изделия для флористики, интерьерного дизайна домов, офисов, учреждений, гостинично-ресторанный ассортимент: линии рюмок, бокалов, фужеров, стаканов и стопок, различной сервировочной посуды; продукцию изготавливаемую по индивидуальным заказам с нанесением логотипов, надписей (фирменные изделия, продукция для рекламного бизнеса, памятные изделия по заказу частных лиц и организаций), а также призы для победителей конкурсов, соревнований, фестивалей и т. д.

Несмотря на значительные экономические трудности, обусловленные жесткой конкуренцией на рынке с иностранными предприятиями и существенным падением потребительского спроса на сортовую посуду и изделия из хрусталя, они, пусть и в меньших объемах, выпускаются на стеклозаводе «Неман». Следует отметить, что из значительного количества предприятий по производству сортовой посуды на постсоветском пространстве к настоящему времени «выжили» лишь несколько. Одним из которых является ОАО «Стеклозавод «Неман» – лидер производства сортового стекла в Беларуси.

Общие тенденции отрасли в настоящее время следующие: уход от производства свинцового хрусталя, ввиду его неэкологичности, выпуск сравнительно дешевой сортовой посуды для кафе, ресторанов, общепита, малотоннажное производство разнообразных сортовых изделий, ориентированных на удовлетворение спроса массового покупателя. Все это требует развития технологии сортового стекла в направлении разработки экологичных составов стекол с высокими декоративно-эстетическими свойствами, компьютеризации и роботизации действующего производства с целью снижения доли ручного труда, разработки новых методов формования, так называемых аддитивных технологий, и декорирования сортовых изделий, автоматизации действующего производства.



ГЛАВА 2

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЗРАЧНОСТИ И ЦВЕТНОСТИ СТЕКОЛ

В настоящее время к сортовому стеклу относят обширный класс стеклоизделий, вырабатываемых из хрустальных и натрий-кальций-силикатных стекол, бесцветных и окрашенных, методами ручного, полумеханизированного и механизированного формования.

При этом одним из основных требований, предъявляемых к сортовым изделиям, является высокое качество самого стекла, под которым понимают высокую светопрозрачность, блеск, белизну для бесцветных стекол либо чистые яркие цветовые спектры для окрашенных стекол. В связи с этим необходимо рассмотреть физические основы прозрачности и окрашивания материалов.

При падении света на твердое вещество между ними происходит взаимодействие, результаты которого наблюдаются в различных оптических явлениях: отражении, поглощении, рассеянии, преломлении, дисперсии и пропускании электромагнитного излучения веществом, а также в появлении окраски у последнего.

У различных типов материалов такие процессы протекают по-разному. Например, металлы, как правило, хорошо отражают свет, что обуславливает блеск их поверхности. Этим же явлением объясняется сияние драгоценных камней.

Хорошо известна прозрачность оксидных стекол, в том числе сортовых, как результат пропускания падающего света при его малом поглощении и отражении. Избирательное поглощение волн определенных участков спектра обуславливает окрашивание ряда материалов. Интенсивное рассеяние света оптически неоднородными стеклами приводит к их глушению (непрозрачные стекла, глазури) и т. д.

Таким образом, оптические свойства, проявляемые твердыми материалами, весьма разнообразны и сложны. В ряде случаев они определяют области применения веществ, как, например, в производстве сортовых изделий, в связи с чем необходимо их подробное рассмотрение.

Показатель преломления и дисперсия. Важной оптической характеристикой многих материалов является их показатель преломления n , от величины которого зависит изменение направления светового луча при его переходе из одной среды в другую (рис. 2.1).

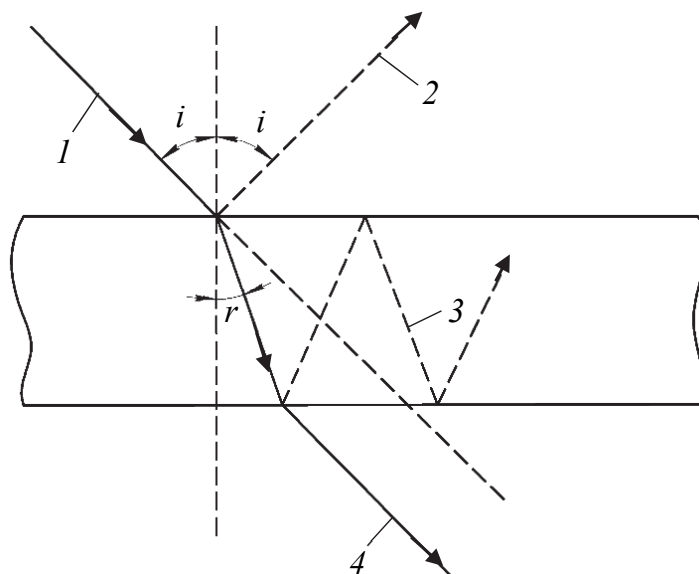


Рис. 2.1. Прохождение света через прозрачную плоскопараллельную пластинку:
 1 – падающий луч; 2 – первично отраженный луч;
 3 – вторично отраженный луч; 4 – прошедший луч

Скорость света c , падающего на твердое вещество, снижается в n раз вследствие взаимодействия с электронами внутри материала, то есть $v = c / n$, где v – скорость света в веществе; c – скорость света в воздухе; n – показатель преломления вещества.

С другой стороны, показатель преломления может быть определен в соответствии с формулой $n = \frac{\sin i}{\sin r}$ как отношение синусов

угла падения и преломления света на границе раздела двух сред. Угол преломления β при переходе света из менее плотной среды в более плотную всегда меньше угла падения, и, соответственно, $n > 1$. Понятно также, что показатель преломления – величина относительная, поскольку может определяться для данного вещества относительно различных сред. За абсолютное значение n материала принимается отношение $\frac{\sin i}{\sin r}$ при переходе луча света из вакуума

в рассматриваемое вещество.

Величина показателя преломления меняется от 1,0003 для воздуха до 1,3–2,7 для твердых оксидов. Показатели преломления силикатных стекол варьируются от 1,5 до 1,9.

После прохождения через прозрачную плоскопараллельную пластинку луч сохраняет свое первоначальное направление, лишь несколько смещаясь (рис. 2.1).

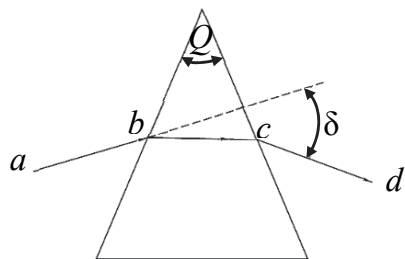


Рис. 2.2. Путь луча при прохождении через призму

Если же луч падает на одну из граней треугольной призмы (рис. 2.2), то, дважды преломившись в точках b и c , он выходит из призмы в другом направлении – cd .

При этом угол ε отклонения луча от первоначального направления зависит от показателя преломления n вещества и величины преломляющего угла θ призмы и определяется уравнением (при малых углах θ).

$$\varepsilon = (n - 1) \cdot \theta. \quad (2.1)$$

Дисперсия света. Величина показателя преломления является функцией частоты световых волн. Для волн фиолетовой части спектра она обычно больше, для красных волн – меньше (рис. 2.3).

Зависимость величины n от длины световой волны известна как явление дисперсии показателя преломления. Количественно дисперсия может характеризоваться разностью показателей преломления вещества, измеренных при некоторых фиксированных длинах волн (монохроматическое излучение). На практике чаще используют излучение желтого цвета в спектре свечения натрия ($\lambda = 589,3$ нм) – D -линия и две линии в спектре свечения водорода: красную ($\lambda = 656,3$ нм) – C -линия и синюю ($\lambda = 486,1$ нм) – F -линия. При этом разность $\Delta n = n_F - n_C$ называют средней дисперсией. В качестве меры дисперсии находят применение и частные дисперсии – разность показателей для средней линии D и одной из крайних линий, т. е. $\Delta n_1 = n_F - n_D$ и $\Delta n_2 = n_D - n_C$, характеризующие изменение n в более узком интервале спектра. Относительные дисперсии равны отношению частных дисперсий к средней, т. е. $(n_F - n_D) / (n_F - n_C)$ и $(n_D - n_C) / (n_F - n_C)$. В практических расчетах часто используется коэффициент дисперсии, или число Аббе:

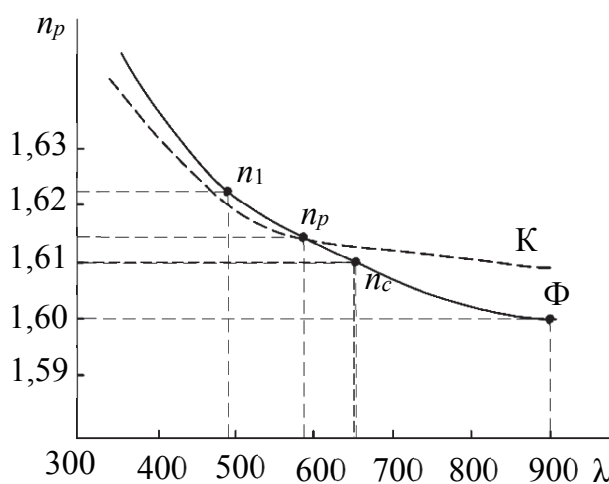


Рис. 2.3. Кривые дисперсии стекол, тяжелый крон К и флинт Ф

$$\vartheta_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}.$$

Причина дисперсии показателя преломления состоит в поглощении энергии излучения электронами вещества. Дело в том, что частота собственных колебаний электронов в твердых веществах соответствует ультрафиолетовой области спектра. При облучении тела ультрафиолетом возникает резонансное поглощение энергии веществом, сопровождающееся возрастанием величины показателя преломления. При увеличении длины волны излучения (уменьшение частоты) поглощение энергии веществом уменьшается, чему соответствует снижение величины n . Вследствие явления дисперсии луч белого света при прохождении через призму разлагается на составляющие его монохроматические лучи, следующие в веществе по различным направлениям (рис. 2.4). В соответствии с формулой (2.1), угол ε , на который отклонится луч после выхода из призмы, для фиолетового излучения больше, чем для красного.

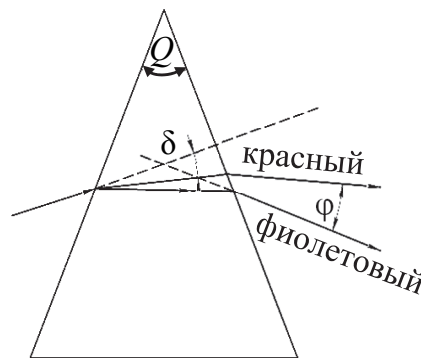


Рис. 2.4. Разложение белого света на составляющие лучи при прохождении через призму

Зависимость показателя преломления n от длины волны падающего света используется при конструировании спектральных приборов, в которых сложное излучение с помощью призмы разлагается на простые монохроматические излучения, подвергающиеся затем анализу. В этом состоит положительная роль дисперсии. Однако феномен дисперсии осложняет создание объективов, поскольку фокусное расстояние линз меняется в зависимости от длины световой волны: для фиолетового излучения оно меньше, чем для красного.

Отражение света веществом. Прохождение света через вещество обычно сопровождается потерями световой энергии, обусловленными следующими явлениями: отражением света поверхностью тела, поглощением и рассеянием излучения веществом. Так что если обозначить интенсивность падающего света через I_0 , то $I_0 = I_1 + I_2 + I_3$, где I_1 – интенсивность отраженного образцом света; I_2 – интенсивность поглощенного и рассеянного света; I_3 – интенсивность пропущенного образцом света. Отсюда $I_1 / I_0 + I_2 / I_0 + I_3 / I_0 = 1$. Полученные отношения характеризуют, соответственно,

долю отраженного света $R = I_1 / I_0$ (коэффициент отражения); долю поглощенного и рассеянного света $A = I_2 / I_0$, а также долю света, пропущенного веществом: $T = I_3 / I_0$ (коэффициент пропускания). Понятно, что $R + A + T = 1$ (либо 100%), причем вклад каждой составляющей для различных веществ изменяется в широких пределах.

Величина коэффициента отражения в общем зависит от показателя преломления вещества и угла падения света. При перпендикулярном падении света на поверхность вещества коэффициент отражения выражается уравнением Френеля: $R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$, откуда

следует, что с увеличением величины n коэффициент отражения материала растет.

Для стекол с показателем преломления, равным 1,5, при нормальном падении луча величина $R = 4,3\%$. С увеличением значения n до 1,9 коэффициент отражения растет до 10%.

Если образец имеет вид плоскопараллельной пластины, следует учитывать отражение от двух поверхностей. При этом, например, для листового стекла общая доля отраженного света $R \approx 9\%$.

Изменение угла падения α света на образец дает следующие значения коэффициента отражения (для листового стекла): $\alpha = 50^\circ \rightarrow R = 6,6\%$; $\alpha = 80^\circ \rightarrow R = 39\%$; $\alpha = 89^\circ \rightarrow R = 91\%$. Таким образом, с увеличением угла падения света на образец растет доля отраженного излучения.

Отражение света от поверхности тел является полезным явлением при гранении драгоценных камней и хрусталя – свинецсодержащего стекла с высоким показателем преломления (величина R в 2 раза выше, чем у обычного стекла). Благодаря этому явлению наблюдается «игра» света на гранях изделия.

Высокая отражательная способность тонких металлических пленок используется в производстве полупрозрачных зеркал, кроме того, материалы с высоким коэффициентом отражения R легко наблюдаются под микроскопом в отраженном свете.

В то же время в сложных оптических приборах с большим числом поверхностей раздела стекло – воздух потери на отражение могут стать чрезмерными (до 60% и выше), что нежелательно. В связи с этим при конструировании оптических устройств принимаются специальные меры для повышения их светопропускания. Речь идет о снижении отражательной способности оптических стекол, обладающих высоким коэффициентом преломления n . Задача решается путем нанесения на поверхность оптических изделий, например

линз, покрытий толщиной около $1/4\lambda$ – длины волны света в той области спектра, где следует получить максимальное пропускание света. Важно, что величина показателя преломления покрытия $n = \sqrt{n_{\text{ст}}}$, где $n_{\text{ст}}$ – показатель преломления стекла. При этих условиях первичная отраженная волна полностью гасится вторичной, с равной амплитудой, но противоположной по фазе. Подобные «просветленные» объективы применяются в микроскопах и других оптических приборах. Этот же метод применяют при получении «невидимого» стекла.

Иногда следует, наоборот, повышать отражательную способность материалов, например, в производстве полупрозрачных зеркал. В этом случае в качестве покрытия стекла используются тонкие металлические пленки с $n > n_{\text{ст}}$.

До сих пор речь шла о зеркальном отражении от гладкой поверхности (полированной), при котором угол отражения равен углу падения света на образец. В ряде случаев поверхности не являются совершенно гладкими, что приводит к диффузному отражению света.

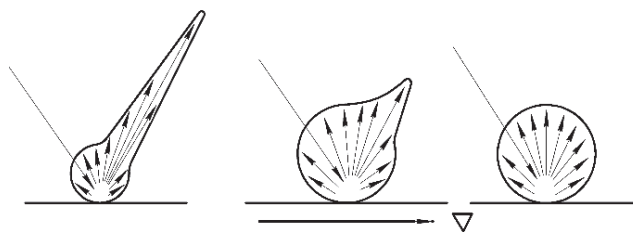


Рис. 2.5. Усиление диффузного отражения света от поверхностей с возрастающей степенью шероховатости V

Распределение энергии отраженного света от поверхностей с возрастающей степенью шероховатости представлено на рис. 2.5. В результате усиления диффузного рассеяния света прозрачные материалы теряют это качество, что используется, например, для получения «матированных» стекол, т. е. не пропускающих прямого излучения. Вторым следствием является потеря блеска поверхностью. Установлено, что это свойство тесно связано с соотношением количества зеркально и диффузно отраженного поверхностью света. Чем выше относительная интенсивность зеркально отраженного луча, тем сильнее блеск образца.

Таким образом, для получения блестящей поверхности, например глазурированного изделия, необходимо:

- использовать составы покрытий с высоким показателем преломления (в соответствии с уравнением Френеля);
- обеспечивать идеальное растекание глазури в процессе обжига (минимальную шероховатость поверхности).

Потери света в веществе. Распространение светового потока, вошедшего в вещество после отражения некоторой его части

поверхностью образца, сопровождается его дальнейшим ослаблением. При этом коэффициент пропускания T вещества подчиняется показательному закону:

$$T = e^{-\varepsilon_e x} \quad (2.2)$$

где ε_e – натуральный показатель ослабления потока; x – толщина образца.

При переходе к десятичным логарифмам, формула (2.2) приобретает вид $T = 10^{-\varepsilon x}$, где $\varepsilon = 0,4343 \varepsilon_e$. Для удобства вычислений часто пользуются величиной оптической плотности $D_e = -\ln T = \varepsilon_e \cdot x$ или $D_{10} = -\lg T = \varepsilon \cdot x = 0,4343 \varepsilon_e \cdot x$. Как следует из приведенных формул, величина D является мерой способности вещества поглощать излучение оптического диапазона. По ее величине может быть вычислен коэффициент ослабления потока света веществом. Например, из соотношения $\varepsilon_e = D_e / x$ следует, что натуральный коэффициент ослабления ε_e есть величина, обратная расстоянию x , на котором поток монохроматического излучения в веществе ослабевает в e раз, и измеряется в сантиметрах в степени -1 . Таким образом, для плоскопараллельной пластины доля прошедшего света T зависит как от потерь на отражение R от двух поверхностей, так и от потерь световой энергии внутри вещества.

Ослабление светового потока в материале происходит вследствие двух независимых и, по сути, различных явлений – поглощения и рассеяния.

Сущность поглощения заключается в том, что часть светового потока, проходящего сквозь среду, необратимо расходуется на увеличение энергии атомов (молекул) вещества. В конечном итоге эта энергия преобразуется в тепловую.

Сущность же рассеяния состоит в том, что часть энергии светового потока, распространение которого в веществе в общем подчиняется законам геометрической оптики, теряется вследствие диффузного рассеяния (из-за неоднородности среды, шероховатости поверхности и др.).

Поскольку показательный закон сохраняет силу для обоих явлений, то их независимость друг от друга позволяет представить показатель ослабления ε в виде суммы $\varepsilon_e = k + \sigma$, где k – показатель поглощения и σ – показатель рассеяния света материалом.

Связь явлений поглощения, пропускания и отражения света. Взаимосвязь между явлениями отражения, поглощения и пропускания электромагнитного излучения в различных типах материалов может быть выявлена с позиций квантовой теории свободных

электронов. Согласно ей, при взаимодействии электронов проводимости вещества со светом величины показателя преломления n , коэффициента отражения R и коэффициента пропускания T металлов и полупроводников зависят от времени свободного пробега τ , подвижности μ и эффективной массы электронов m^* .

Эта параметры связаны между собой следующим выражением: $\tau = m^* \cdot \mu / e$. Характеризуя оптические свойства материалов, чаще используют величину $\gamma = 1 / \tau = e / (m^* \cdot \mu)$, называемую частотой релаксации и соответствующую числу столкновений электронов проводимости с решеткой в единицу времени.

Если частота релаксации γ превышает частоту ω падающего на объект излучения, то происходит его поглощение электронами проводимости; если же $\omega > \gamma$, то поглощение излучения не наблюдается.

Действительно, при падении света на вещество с электронной проводимостью свободные электроны поглощают энергию $E = h \cdot \nu$, где h – постоянная Планка; ν – частота света. Если при этом длина волны λ превышает длину свободного пробега электронов, последнее при прохождении света испытывают несколько столкновений на расстоянии, соответствующем длине волны падающего света ($\omega < \gamma$). При этом поглощенная электронами световая энергия передается решетке, преобразуясь в тепловую. В данном случае проявляется так называемое поглощение проводимости.

Когда же длина световой волны λ оказывается существенно короче, чем средняя длина свободного пробега ($\omega > \gamma$), электроны ведут себя как свободные и лишь рассеивают свет, но не поглощают его.

Второй важной для оптических свойств материалов характеристикой является так называемая плазменная частота ω_p . Теорией свободных электронов показано, что «газ» свободных электронов в веществе ведет себя подобно газовой плазме, образованной подвижными заряженными частицами. При любом смещении электронного газа относительно системы ионов возникает возвращающее электрическое поле, т. е. электронный газ совершает колебания относительно положения равновесия с некоторой характерной для данного вещества частотой ω_p :

$$\omega_p = 2\pi \cdot c / \lambda_p = (n \cdot e^2 / \epsilon_0 \cdot m^*)^{1/2}, \quad (2.3)$$

где λ_p – длина волны электромагнитного спектра, соответствующая плазменной частоте ω_p ; n – плотность электронов проводимости; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума.

Как следует из уравнения, величина ω_p для различных материалов в основном определяется числом свободных электронов в единице их объема. Поэтому для металлов, в которых плотность электронов проводимости очень велика ($\sim 10^{28} \text{ м}^{-3}$), плазменная частота соответствует ультрафиолетовой области электромагнитного спектра ($\omega_p = 300 \text{ нм}$); для плазмы в полупроводниках типичные значения ω_p расположены в инфракрасной области спектра. При этом если частота ω падающего на вещество излучения превышает характеристическую частоту ω_p , то плазма является прозрачной для него и такое излучение пропускается веществом; при $\omega < \omega_p$ плазма электронов является непрозрачной и полностью отражает такое электромагнитное излучение.

На основании приведенных выше закономерностей установлена зависимость между угловой частотой света ω и коэффициентом отражения R вещества, причем:

- 1) если $\omega \ll \gamma$, то $R = 1 - 2[\omega / (2\pi \cdot c)]^{1/2}$, в итоге свет претерпевает отражение, а также поглощается на электронах проводимости;
- 2) если $\gamma < \omega < \omega_p$, то $R = 1 - 2\gamma / 2\omega_p$, при этом свет только отражается, но не поглощается веществом;
- 3) если $\omega > \omega_p$, то $R = 0$ и свет пропускается.

С помощью данных соотношений возможно объяснение оптических свойств различных материалов. Например, в металлах, где ω_p соответствует ультрафиолетовой области спектра, частота релаксации $\gamma = 10^{13} \text{ с}^{-1}$, что соответствует инфракрасной области. Это означает, что видимый свет ($\gamma < \omega < \omega_p$) будет отражаться от поверхности металла, создавая металлический блеск. Инфракрасные лучи ($\omega < \gamma$) отражаются и поглощаются, а излучение с длиной волны, меньшей ультрафиолета ($\omega > \omega_p$), пропускается.

В полупроводниках и диэлектриках плотность электронов проводимости (n) низка по сравнению с металлами, поэтому из уравнения (2.3) следует, что плазменная частота ω_p имеет малое значение (соответствует инфракрасной части спектра), в связи с чем выполняется условие (3) $\omega > \omega_p$, и эти материалы в области световых частот должны быть прозрачными. Действительно, изоляторы полностью пропускают видимый свет (за исключением отраженного), поэтому они становятся прозрачно-бесцветными.

Интерес представляет рассмотрение процесса взаимодействия света с оксидом SnO_2 – полупроводником со сравнительно широкой запрещенной зоной ($-3,6 \text{ эВ}$). Расчет величины γ_{SnO_2} дает значение $1,85 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$. Величина ω_p , вследствие наличия дефектов структуры и примесей, приближается к величине $-2,1 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$, что соответствует

$\lambda_p = 2300$ нм. Таким образом, излучение с $\lambda > 2300$ нм отражается, а волны коротковолнового диапазона (включая видимый свет) пропускаются. В связи с этим подобные оксиды (SnO_2 , In_2O_3 и др.) используются в качестве пленочных покрытий, отражающих ИК-излучение.

Запрещенная зона таких полупроводников, как кремний, германий, очень узкая (соответствует К-области спектра), поэтому видимый свет ими поглощается, однако в инфракрасной области существует зона пропускания.

Поглощение света веществом. Как показано выше, поглощение света веществом является следствием изменения энергетического состояния его электронов (молекул).

На рис. 2.6 схематически изображен типичный спектр поглощения ионного кристалла.



Рис. 2.6. Типичный спектр поглощения ионного кристалла:

1 — остаточное поглощение; 2 — примесное;
3 — экситонное; 4 — собственное

Как следует из рисунка, при падении на вещество электромагнитного излучения с энергией $E = h \cdot \nu$, значение которой превышает ширину запрещенной зоны кристалла ΔE , происходит его полное поглощение. Такое поглощение называется собственным (область 4). Так как ширина ΔE запрещенной зоны диэлектриков, к которым относятся большинство силикатных стекол, а также кристаллы с ионной связью, велика, то их собственное поглощение проявляется обычно в области коротких волн (короче ультрафиолетовых).

Экситонное поглощение (область 3) связано с возбуждением электронов из валентной зоны в зону проводимости, при этом экситон (пара электронов + дырка) находится в локализованном состоянии.

Примесное поглощение основано на возбуждении электрона с уровня, образованного в запрещенной зоне дефектами решетки (например, центрами окраски), в зону проводимости или на возбуждении электронов из валентной зоны на примесный уровень. Кроме того, следует учитывать поглощение, связанное с колебаниями ионной решетки, проявляющееся обычно в инфракрасной области спектра (область 1).

Помимо рассмотренных видов поглощения для материалов, содержащих переходные элементы, в видимой области проявляется поглощение, связанное с электронными переходами на незаполненных орбиталях этих атомов. У металлов в инфракрасной области проявляется поглощение на электронах проводимости. Для полимеров характерно поглощение в видимой области благодаря функциональным группам $C=O$, $N \equiv N$ и др.

Выше было показано, что общая доля прошедшего через материал (в виде пластинки) света зависит как от потерь на отражение,

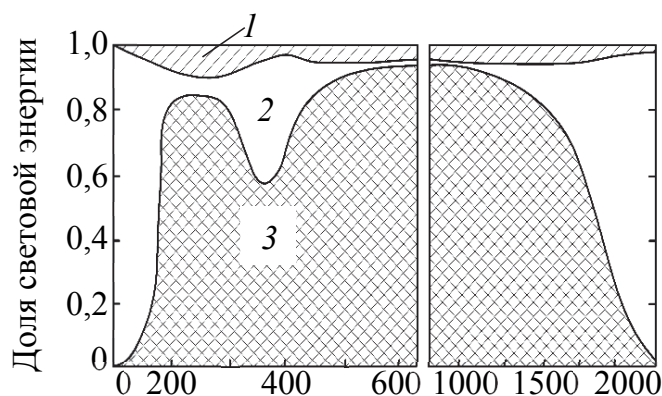


Рис. 2.7. Соотношение между поглощением, отражением и пропусканием света для зеленого стекла при различной длине световой волны:

1 – отражение; 2 – поглощение;
3 – пропускание

так и от потерь на поглощение. Поэтому при нормальном падении света коэффициент пропускания $T = (1 - R)^2 \cdot e^{-ax}$, где R – коэффициент отражения; a – коэффициент поглощения; x – толщина пластинки. Необходимо также помнить, что $A + R + T = 1$, где A , R , T – доля поглощенного, отраженного и прошедшего через образец света. Относительная величина этих слагаемых

может меняться с изменением длины волны падающего излучения, как, например, показано на рис. 2.7.

Как следует из рисунка, рассматриваемый материал прозрачен в интервале длин волн от 200 (ультрафиолет) до 2000 нм (инфракрасное излучение). При этом величина коэффициента поглощения сильно зависит от длины волны, а избирательное поглощение в области 350–600 нм (зеленые волны) является причиной окрашивания вещества и обусловлено наличием в структуре соответствующих центров окраски. Коэффициент поглощения в этом случае будет

пропорционален концентрации C поглощающих свет ионов, т. е. $\Delta = e^{-\varepsilon x}$, ε – показатель поглощения на единицу концентрации красящих элементов, x – толщина образца.

Центры окраски и цветность веществ. Образование центров окраски в ННМ может быть рассмотрено на примере ионных кристаллов. Может случиться, что в таком кристалле число анионных вакансий не равно числу вакансий катионов. Как же обеспечивается в этом случае электронейтральность кристалла? Пусть в решетке NaCl не хватает ионов Cl^- . Однако она остается нейтральной, поскольку валентные электроны ионов Na^+ , не связанные ионами Cl^- , являются частично свободными и, компенсируя нехватку отрицательных зарядов, располагаются по соседству с дефектом решетки. Структура такого кристалла может быть описана следующим образом: $(\text{Cl}_{1-x}^- / \square) \text{Na}_1^+$, где знаком $\square$ обозначаются вакансии.

Анионная вакансия, оккупированная электроном, образует так называемый F -центр (от немецкого Farbencenter), стабильный при нормальной температуре. Наличие F -центров обеспечивает поглощение падающего света, т. е. появление полосы поглощения в спектре пропускания NaCl, в соответствующей области

длин волн, а также окрашивание бесцветных кристаллов. Пусть сейчас в

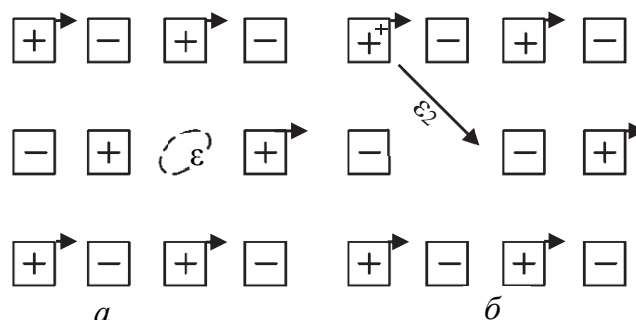


Рис. 2.8. Образование F -центра в кристалле NaCl

кристалле NaCl не хватает ионов Na^+ . Казалось, ион Cl^- , соседний с катионной вакансией, не может завершить формирование стабильной электронной оболочки (октет электронов). Однако на практике стремление к устойчивому состоянию таково, что атом Cl превращается в ион Cl^- , вырывая электрон из 2р-слоя соседнего атома Na, образуя положительную «дырку». Структура вещества в данном случае записывается следующим образом: $\text{Cl}_1^-(\text{Na}_{1-x}^+ \text{p}_x / \square)$ (рис. 2.8).

Наличие указанных дефектов структуры дополнительно обеспечивает кристаллу некоторую электропроводность. При этом анионные вакансии приводят к проводимости типа n (n -полупроводники), катионные вакансии – к p -полупроводникам.

Выше рассмотрен лишь один из многих типов центров окраски в веществах. Другие возможные типы: центр типа V представлен

взаимодействующей парой вакансий противоположного знака и дает полосу поглощения в ультрафиолетовой части спектра. Центр F' образован анионной вакансией, с которой взаимодействуют два связанных электрона. F -центр в комбинации с анионной вакансией образуют центр R_1 . Два смежных F -центра образуют R_2 -центр. F -центр, связанный с парой вакансий противоположного знака, образует M -центр. Все эти красящие центры, поглощая в красной и ультракрасной областях спектра, могут быть получены после обработки кристалла, например, γ – или рентгеновскими лучами, после бомбардировки его нейтронами, или после нагрева в атмосфере, обогащенной элементами, его составляющими (паров Na^+ или Cl^+). Так, энергия рентгеновских лучей оказывается достаточной, чтобы деионизировать ион Cl^- : $\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}^0 + e^-$. Освободившийся электрон улавливается анионной вакансией с образованием F -центра. Второй возможностью образования красящих центров является существование нестехиометрических соединений, часто образуемых оксидами с переменной валентностью: Fe, Mg, Ni, Pb, Ti, Cu, V. Наличие катионных вакансий в них может компенсироваться изменением валентности переходных элементов. Типичным примером является FeO, в котором всегда присутствуют вакансии Fe^{+2} . Для компенсации нехватки каждого положительного заряда решетки два иона Fe^{+2} переходят в Fe^{+3} в соответствии с уравнением



Таким образом, электронные переходы (внешних неспаренных электронов) обуславливают появление окраски и полупроводимости у соединений переходных элементов ($3d$ -элементы).

К ионным красителям принадлежат и катионы редкоземельных элементов ($4f$ -элементы), особенность электронного строения которых состоит в наличии незаполненных внутренних орбиталей.

При введении подобных катионов (d - или f -элементов) в любую среду (прозрачные кристаллы, стекла, растворы) возникают типичные спектры поглощения, характерные для определенной степени окисления данного элемента.

Отклонение состава веществ от стехиометрического может быть также следствием присутствия в них примесей с более низкой либо с более высокой валентностью, чем у атомов, составляющих основу вещества. В этом случае примесные атомы действуют как доноры либо акцепторы электронов, создавая, соответственно, дополнительные донорные либо акцепторные уровни в запрещенной зоне вещества.

Это приводит к появлению дополнительных полос поглощения в спектре светопропускания материала. Если эти полосы поглощения попадают в видимую область спектра, то вещество приобретает окраску. Таким образом, при изменении энергетического состояния электронов в атомах возможно поглощение видимого света веществом.

Материалы, состоящие из ионов (атомов) с заполненной электронной оболочкой (как у инертных газов), прозрачны и бесцветны. Но если имеются в наличии незаполненные энергетические уровни (*d*- и *f*-элементы) либо образуются дополнительные уровни при введении примесей, то наблюдается поглощение в видимой части спектра. При этом имеющие место электронные переходы соответствуют определенному интервалу энергии, в результате чего в спектрах наблюдаются более или менее широкие полосы поглощения.

Рассеяние света веществом. Рассеяние света во всякой среде обусловлено ее микронеоднородностью, что приводит к различию показателя преломления малых объемов, находящихся на удалении друг от друга, сравнимом или меньшем длины волны падающего излучения.

Например, микронеоднородность стекол может вызываться отклонением соотношения компонентов в отдельно взятом малом объеме от среднего либо различием структуры соседних малых участков (неупорядоченная сетка и кристаллит).

Кроме того, оптическая неоднородность материала может быть следствием появления в нем микронапряжений, возникающих, например, при охлаждении вследствие различия коэффициента расширения его микрообъемов с различным химическим составом либо структурой.

К оптически неоднородным системам, рассеивающим свет, относятся также материалы, содержащие небольшие частицы второй фазы (стекловидной либо кристаллической), распределенные по объему. Примером подобных материалов являются заглушенные ликвацией «молочные» стекла, глазури и эмали.

Для перечисленных выше гетерогенных в оптическом отношении материалов величина рассеяния зависит в основном от следующих факторов:

- отношения размера частиц к длине волны падающего света;
- соотношения показателей преломления фазы и среды;
- объема дисперсной фазы.

Влияние размера частиц на величину коэффициента рассеяния σ глушеного двуокисью титана стекла представлено на рис. 2.9. Как следует из рисунка, рассеяние света вначале растёт, оказываясь максимальным, когда размер частиц имеет тот же порядок

величины, что и длина волны падающего света. В дальнейшем коэффициент рассеяния уменьшается в обратной пропорциональности к размеру дисперсной фазы.

Для того чтобы рассеяние было максимальным, показатель преломления частиц дисперсной фазы должен сильно отличаться от показателя преломления фазы. В связи с этим при глушении силикатных глазурей, имеющих обычно показатель преломления в пределах 1,50–1,65, используются ZrO_2 ($n = 2,2$) и TiO_2 ($n = 2,76$), тем более что они инертны по отношению к стекловидной фазе.

Понятно, что эффект глушения также возрастает с увеличением концентрации дисперсной фазы.

В особенности значительную роль играет рассеяние света в случае спекшихся поликристаллических керамических материалов. При этом влияющими факторами являются неоднородность состава и структуры отдельных микрообластей (зерен), а также анизотропия кристаллов. В основном просвечиваемость подобных веществ определяется величиной их пористости. К примеру, в кера-

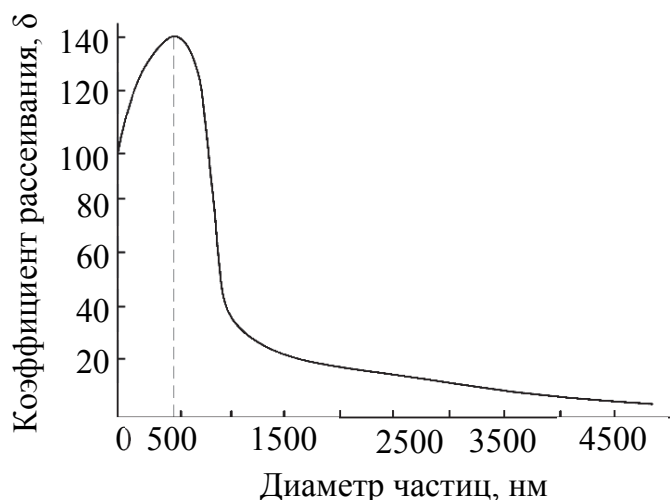


Рис. 2.9. Влияние размера частиц дисперсной фазы на величину коэффициента рассеяния стекла, глушенного TiO_2

мике на основе корунда твердая фаза (зерна Al_2O_3) имеет показатель преломления $n = 1,8$, в то время как показатель преломления пространства пор близок к единице, т. е. разница между ними достаточно велика. Размер пор в такой керамике обычно соответствует размеру частиц исходного порошка (0,5–2,0 мкм), т. е. близок к длине световых волн. В итоге рассеяние света в материале оказывается очень значи-

тельным. Даже при пористости 0,3% материал пропускает только около 10% света от пропускаемого абсолютно плотным образцом.

В связи с этим при получении прозрачных керамических материалов в первую очередь решается проблема удаления пор из спекаемого вещества. Это достигается:

- использованием ультрадисперсных порошков высокой чистоты;
- ограничением роста зерен в процессе спекания.

Оптически прозрачные материалы. Наиболее распространенными материалами, прозрачными к излучению оптического диапазона, являются силикатные стекла. Прозрачными также являются некоторые кристаллические тела и стеклокристаллические материалы, получившие распространение относительно недавно.

Как следует из сказанного выше, способность однородных гомогенных по структуре материалов пропускать (либо поглощать) видимый свет является результатом взаимодействия электромагнитного светового излучения с $\lambda = 380\text{--}760$ нм и вещества.

Для всех типов известных веществ, независимо от того, находятся они в стеклообразном или кристаллическом состоянии, условие прозрачности может быть выражено соотношением

$$hc / \lambda < \Delta E, \quad (2.4)$$

где h – постоянная Планка; c – скорость света; λ – длина волны падающего света; ΔE – ширина запрещенной зоны, или энергия, необходимая для переброса электронов из валентной зоны в зону проводимости.

Таким образом, энергия излучения должна быть меньше ширины запрещенной зоны вещества. В данном случае речь идет о «собственном» поглощении вещества, зависящем от его природы. При этом подразумевается отсутствие поглощения, обусловленного оптической неоднородностью вещества, наличием раздела фаз, неоднородностей, присутствием красящих центров и др.

Легко выводимое из соотношения (2.4) граничное условие прозрачности выглядит следующим образом:

$$\frac{hc}{\lambda_{\text{гр}}} = \Delta E,$$

Из соотношения следует, что энергия кванта излучения с длиной волны $\lambda < \lambda_{\text{гр}}$ окажется достаточной для возбуждения электронов валентной зоны и переброски в зону проводимости, что будет сопровождаться поглощением энергии электромагнитного излучения.

Отсюда

$$\lambda_{\text{гр}} = hc / \Delta E.$$

Вещество пропускает свет при $\lambda > \lambda_{\text{гр}}$, так как энергия кванта hc / λ оказывается меньше ΔE . Наоборот, вещество непрозрачно для волн с $\lambda < \lambda_{\text{гр}}$ из-за возбуждения валентных электронов в зону

проводимости. Зная ширину запрещенной зоны оптически однородного вещества, легко определить его границу пропускания. Например, кварцевое стекло с $\Delta E = 8,1$ эВ имеет $\lambda_{\text{тр}} = 132$ нм, что определяет его высокую прозрачность в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра.

Высокую прозрачность в оптическом диапазоне имеют и силикатные стекла, не содержащие примесей переходных элементов, боратные и фосфатные стекла. Их высокая прозрачность в видимой области обусловлена следующими факторами:

- большая ширина запрещенной зоны;
- элементы, входящие в состав подобных стекол (Si, Ca, Mg, Al, Na, O и др.), имеют заполненные электронные орбитали и не содержат неспаренных электронов;
- стекло является однородной и однофазной средой, где отсутствуют границы раздела фаз, вызывающие рассеяние света.

Сказанное выше вполне относится также к монокристаллическим веществам.

В настоящее время известен целый ряд прозрачных поликристаллических материалов: от ставших уже традиционными прозрачными средами – Al_2O_3 (лукалокс), Y_2O_3 (иттралокс), MgO до относительно новых видов прозрачных материалов на основе TiO_2 и BeO_2 , магнезимальной шпинели MgAl_2O_4 , ZrO_2 , Sc_2O_3 .

Из известных областей применения обращает на себя внимание использование прозрачных КМ в качестве излучательных трубок натриевых ламп высокого давления. Появление подобных ламп (начало 60-х гг. XX ст.) с трубками из прозрачной корундовой керамики – одно из наиболее значительных событий в развитии источников света. Таким образом, было положено начало созданию новой группы газоразрядных источников оптического излучения, использующих разряд высокого давления в парах агрессивных металлов и соединений. Создание Na-ламп высокого давления стало возможно лишь после получения светопропускающего материала, выдерживающего высокие температуры и устойчивого к воздействию паров щелочных металлов. Для них характерны высокая световая отдача и малые размеры светящегося тела при высокой яркости, а также длительные сроки службы, удовлетворительное качество светопередачи, высокий КПД. Это делает Na-лампы перспективными источниками наружного и внутреннего освещения. Интегральное светопропускание трубок из прозрачного оксида алюминия составляет 90–92%.



ГЛАВА 3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ СОРТОВОГО СТЕКЛА

В быту используются самые разнообразные виды изделий из сортового стекла. Это, прежде всего, стеклянная посуда и декоративные изделия: стаканы, изделия на ножке, вазы для цветов и фруктов, письменные и туалетные приборы, пепельницы, художественные изделия и т. д. Изделия из стекла изготавливают различных цветов и оттенков, с разнообразной художественной отделкой.

Посуда и декоративные изделия должны отличаться высоким качеством, разнообразием ассортимента, быть изящными по форме. Характер декорирования должен быть органически связан с их формой и назначением.

Основными требованиями к посуде являются химическая устойчивость и хороший внешний вид (блеск, прозрачность, чистота цвета). Высокой термостойкостью должны обладать чайные стаканы.

Изделия не должны иметь пороков, заметно портящих внешний вид: камней, свилей, пузырей. Рисунок на изделиях должен быть четким и правильным, края и грани не должны быть режущими.

Классификация изделий производится:

- 1) по назначению;
- 2) видам стекол;
- 3) способам выработки;
- 4) сложности конфигурации;
- 5) способам декорирования.

Изделия по назначению делят на посуду и декоративные изделия из стекла. К стеклянной посуде относят изделия, используемые в быту, на предприятиях общественного питания для приготовления пищи, напитков и сервировки стола.

Сортовые стекла подразделяются согласно ГОСТ 24315-80 на следующие виды: натрий-кальций-силикатное, специальное бытовое, хрустальное, малосвинцовый хрусталь, свинцовый хрусталь, высокосвинцовый хрусталь, бариевый хрусталь.

По способам выработки различают изделия ручного и механизированного выдувания, прессованные, прессовываемые, изделия

сочлененные (многостадийной выработки), центрифугированной выработки, моллированные, из накладного стекла.

По сложности конфигурации бывают изделия, имеющие сосуд простой и сложной конфигурации; изделия на воронкообразной, простой и фигурной ножке; изделия с утолщенным дном, изделия на поддоне; рюмочные изделия на массивной ножке.

По способам декорирования изделия подразделяют на декорированные в горячем и холодном состоянии. Декорированием в горячем состоянии получают изделия свободного выдувания (гутные), с орнаментом, оптическим эффектом, рельефами, газовыми и инородными включениями, изделия «кракле» и т. д. Изделия из стекла, декорированные в холодном состоянии, делят на изделия с плоской и алмазной гранью, матовым шлифованием, гравированные, с пескоструйной обработкой, декорированные травлением, с поверхностными покрытиями (роспись, шелкотрафаретная печать, распыление, переводные рисунки – деколи).

3.1. Общая технологическая схема производства сортовых изделий

Сортовую посуду производят в основном по следующей технологической схеме. Сырье со склада поступает в составной цех, где оно подвергается сушке, дроблению, просеву и т. д. Для обеспечения высокого качества бесцветных натрий-кальций-силикатных и хрустальных стекол и достаточной чистоты поступающего сырья проводят обогащение сырья, главным образом песка. Цель обогащения – снизить количество оксидов железа, придающих стеклу нежелательную окраску. К операциям обогащения песка, проводимым на заводах сортовой посуды, относятся промывка на сотрясательном столе и электромагнитная сепарация.

Обработанные сырьевые материалы направляют в бункера для хранения. Далее их отвешивают по заданному рецепту для составления шихты. Как правило, добавляют малые количества материалов, обеспечивающих высокое качество сортовых стекол: осветлителей и обесцвечивателей, красителей.

Для смешивания шихты применяют различные типы смесителей. Так, шихту для цветных стекол удобнее смешивать в контейнерных смесителях, а для бесцветных стекол – в тарельчатых.

Полученную шихту подают к ванной печи и загружают в нее загрузчиком. Обратный бой из цеха подают к засыпчному карману печи и загружают вместе с шихтой.

Варят стекло в горшковых и ваннных печах. После варки стекла изделия вырабатывают тремя способами: ручным, полумеханизированным и механизированным. Ручным способом вырабатывают обычно выдувные изделия сложной конфигурации и больших размеров. Основной инструмент – стекловыдувная трубка и различные приспособления. Полумеханизированным способом вырабатывают в основном изделия центробежного формования и прессованные. При этом осуществляют ручной набор стекломассы, механизированную подачу ее в форму и ручную выемку изделия из формы.

Механизированным способом вырабатывают как прессованные, так и выдувные изделия массового ассортимента: стаканы, изделия на ножке, пепельницы, солонки, розетки для варенья и т. п. При механизированном изготовлении изделий на ножке сочетаются операции прессования и выдувания. Края и поверхности прессованных изделий подвергают термической обработке обычно с помощью газовых горелок.

Для выдувных высокохудожественных изделий возможны различные способы декорирования в горячем состоянии.

После термической обработки и горячего декорирования или без них изделия поступают на отжиг, затем у выдувных изделий отделяют колпачок, производят обработку края. Край тонкостенных изделий массового производства предварительно шлифуют и оплавливают. Край толстостенных изделий шлифуют и полируют механическим способом.

После предварительной обработки сортовые изделия декорируют, шлифуют, гравировать, наносят поверхностные покрытия красками, люстрами, золотом. Способ декорирования зависит от вида стекла: изделия из хрусталя и накладного стекла декорируют обычно алмазной гранью, а изделия из бесцветного натрий-кальций-силикатного стекла – поверхностными покрытиями, закрепляемыми обжигом. Шлифованные рисунки подвергают химическому (изделия из хрусталя) и механическому (изделия из бесцветных и цветных натрий-кальций-силикатных стекол) полированию. Существуют и другие виды декоративной обработки: химический, диффузионный, фотопечать и т. д.

Выдувные изделия сортовой посуды в связи с многообразием видов обработки контролируют обычно дважды. После отделения

колпачка проверяют качество стекла и выработки, а после декорирования – качество обработки. Прессованные изделия, подвергающиеся дополнительной декоративной обработке, также контролируются дважды. Выдувные чайные стаканы дополнительно контролируют на термостойкость, закаленные изделия – на прочность и термостойкость. Отсортированные в соответствии с нормативно-технической документацией изделия маркируют, упаковывают и отправляют на склад готовой продукции.

Контроль качества готовых изделий должен сочетаться с контролем всего технологического цикла, так как высокое качество изделий обеспечивается стабильностью технологических процессов и операций, соответствием их установленным параметрам.

! 3.2. Типы и характеристика сортовых стекол

Стекла, применяемые в производстве бытовой посуды и декоративно-художественных изделий, разнообразны, отличаются составом, физико-химическими свойствами, эксплуатационными и цветовыми характеристиками (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Виды сортовых стекол

Термин	Определение
Натрий-кальций-силикатное стекло	Бесцветное стекло, содержащее в основном оксиды SiO_2 , Na_2O , K_2O , CaO , MgO и дополнительные компоненты
Хрустальное стекло	Бесцветное стекло, содержащее в основном SiO_2 , а количество оксидов PbO , BaO , K_2O , ZnO в отдельности или в сочетании не менее 10%, имеющее показатель преломления не менее 1,520 и плотность не менее 2400 кг/м^3
Малосвинцовый хрусталь	Хрустальное стекло, содержащее от 18 до 24% PbO , имеющее показатель преломления не менее 1,530 и плотность не менее 2700 кг/м^3
Свинцовый хрусталь	Хрустальное стекло, содержащее от 18 до 30% PbO , имеющее показатель преломления не менее 1,545 и плотность не менее 2900 кг/м^3
Бариевый хрусталь	Хрустальное стекло, содержащее не менее 20 BaO и оксиды щелочных металлов, имеющее показатель преломления не менее 1,530 и плотность не менее 2700 кг/м^3
Цветное стекло	Прозрачное или непрозрачное стекло, способное пропускать волны определенной длины или диффузно рассеивать свет и содержащее красители, глушители или их смеси

Бесцветные натрий-кальций-силикатные стекла. Эта группа стекол является достаточно широкой и применяется при ручном и механизированном производстве изделий различного ассортимента. Рекомендуемые составы стекол приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Рекомендуемые составы натрий-кальций-силикатных стекол

Способ выработки	SiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	BaO	B ₂ O ₃	R ₂ O ₃ + SO ₃
Ручной	75	6,5	2	2,5	13,5	—	—	—	0,5
Механизиро- ванный: — прессован- ные изделия	73	7	2,5	2	13	2	—	—	0,5
— выдувные изделия	70,5– 71,5	6,5– 7,0	3,0– 3,5	2,8– 5,4	11,6– 14,6	До 1,6	До 3	До 1,5	До 0,5

Характерной и наиболее часто встречающейся примесью в бесцветных стеклах являются оксиды железа, попадающие в стекло из сырьевых материалов, главным образом, песка, мела, доломита, из огнеупоров печи и стеклобоя. Допустимое количество оксидов железа – 0,04%. При превышении этого количества (до 0,08) появляются нежелательные желто-зеленые оттенки, которые можно устранить обесцвечиванием.

В основном на промышленных предприятиях используют в качестве химических обесцвечивателей 0,04–0,12 As₂O₃ или 0,04–0,12% CeO₂, в качестве физических обесцвечивателей – преимущественно 0,0005–0,0140% Se в сочетании с оксидом кобальта. Такой широкий интервал концентраций селена связан с нестабильностью газовой среды при варке и содержания оксидов железа в стекле. Оптимальное количество Se при обесцвечивании 0,002–0,004% при содержании 0,04–0,06 Fe₂O₃. Концентрация CoO – 0,00008–0,00020% в зависимости от содержания оксидов железа. Основные технологические параметры варки и выработки бесцветных натрий-кальций-силикатных стекол зависят от способа выработки (табл. 3.3).

Значительное различие температур выработки связано с применением автоматов с капельным (1170–1180°C) и вакуумным питанием (1260–1275°C).

Таблица 3.3

**Зависимость основных технологических параметров
от способа выработки**

Параметры	Выработка	
	ручная	механизированная
Соотношение шихты и боя, %	(55–50)/(45–50)	(70–75)/(30–25)
Температура, °С:		
– варки	1460–1480	1470–1490
– выработки	1220–1250	1170–1275

Хрустальные стекла. Составы хрустальных стекол разнообразны; вводимые оксиды должны обеспечить комплекс физико-химических свойств и технологических характеристик. Химический состав свинцовых хрусталей, %: SiO_2 – 56,5–68,0; PbO – 12–24; B_2O_3 – до 2; ZnO – до 1,5; K_2O – 9–16; Na_2O – до 1,5; CaO – до 4; $(\text{R}_2\text{O}_3 + \text{SO}_3)$ – до 0,5. Одним из важнейших показателей качества хрусталей является отсутствие видимых цветовых оттенков. Этот показатель определяется качеством сырья, выбором обесцвечивателей и окислительными условиями варки. Обесцвечивание хрустальных свинецсодержащих стекол проходит более стабильно, чем натрий-кальций-силикатных, так как в качестве физического обесцвечивателя в основном применяют соединения никеля (оксид никеля или нитрат никеля). Ион никеля присутствует в стекле в одной степени окисления, и на его цветовые оттенки не влияет режим варки. Оксид никеля имеет высокую красящую способность и вводится в количестве 0,0003–0,0006%. Лучшими физическими обесцвечивателями являются соединения редкоземельных элементов – неодима и эрбия, окрашивающие хрусталь в розовые и пурпурные цвета, дополнительные к зеленоватым. Их применение сдерживается высокой стоимостью.

Создание достаточных окислительных потенциалов стекломассы и атмосферы печи позволяет избежать восстановления оксидов свинца и железа. Окислительный потенциал стекломассы определяется содержанием селитры, мышьяка и свинцового сурика в шихте. Совместное введение этих компонентов в шихту обеспечивает наличие кислорода в течение всего процесса варки стекла. Окислительный потенциал атмосферы печи создается при полном сгорании топлива. В продуктах сгорания не должно быть CO при коэффициенте избытка воздуха 1,25–1,30, что предотвращает возникновение даже локальных восстановительных условий.

В качестве химических обесцвечивателей хрустальных стекол применяют 0,3–0,5% оксида мышьяка в сочетании с селитрой. Рекомендуется вводить с селитрой 4–8% K_2O . Можно также использовать 0,15–0,30% CeO_2 . Преимущества оксида церия – в его высокой окисляющей способности, нетоксичности, однако вводить более 1% оксида церия в хрустальные стекла нежелательно из-за возможного появления желтоватых оттенков.

При расчете шихты хрустальных стекол учитывают потери оксида свинца при засыпке и его улетучивание непосредственно из расплава. Улетучивание оксида свинца при варке в газопламенных печах составляет 4–8% в зависимости от способа выработки. Электрическая варка хрусталя, осуществляемая под слоем шихты, позволяет снизить улетучивание PbO до 0,5–2,0%, B_2O_3 до 5%, сократить ввод As_2O_3 до 0,2% и щелочей с селитрой – до 1,5%.

Варку хрустальных стекол производят в основном в ваннных печах непрерывного действия (проточных с поперечным, подковообразным или продольно-поперечным направлением пламени). Небольшие количества хрустальных стекол варят в горшковых печах. Особенности конструкции ваннных печей являются глухие экраны по пламенному пространству, индивидуальный обогрев варочной и выработочной частей, механические мешалки в рабочей части печи. Освоена варка хрустальных стекол в электрических печах производительностью от 0,5 до 20 т в сутки.

Технологические параметры варки и выработки различаются в зависимости от состава стекла и способа выработки (табл. 3.4).

Таблица 3.4

**Различия технологических параметров от состава стекла
и способа выработки**

Параметры	Выработка	
	ручная	механизированная
Соотношение шихты и боя, %	(55–50)/(45–50)	(70–75)/(30–35)
Температура, °C:		
– варки свинцового хрусталя	1420–1440	1440–1450
– выработки свинцового хрусталя	1170–1180	1150–1220
– варки хрустальных стекол, бариевого хрусталя	1450–1460	1470–1480
– выработки хрустальных стекол, бариевого хрусталя	1180–1200	1180–1260

Цветные и глушеные стекла. Группа цветных стекол является наиболее обширной. Качество и свойства цветных стекол определяются их составом, рецептурой красителей и шихты, режимами варки и способами выработки.

Большинство цветных стекол относится к группе натрий-кальций-силикатных, кроме того, используются составы стекол с повышенным содержанием оксида цинка для варки селенового рубина, а также составы свинцовых хрусталей с различным содержанием оксида свинца. Рекомендуются для применения следующий оптимальный состав стекла в качестве основы для цветных стекол, %: SiO_2 – 74–75, $\text{CaO} + \text{MgO}$ – 8, K_2O – 5, Na_2O – 11, B_2O_3 – 1–2. Варочные и выработочные свойства стекол такого состава отвечают предъявляемым требованиям. В табл. 3.5 дано содержание красителей для получения некоторых цветных стекол на основе оптимального состава стекла.

Таблица 3.5

Красители для цветных стекол

Цвет стекла	Содержание красителей, кг на 100 кг стекломассы
Дымчатый	0,003 Cr_2O_3 , 0,005 Co_2O_3 , 0,02 NiO , 0,45 Fe_2O_3
Фиолетовый	0,6–3,0 KMnO_4 , 0,025 Co_2O_3 , 2–3 KMnO_4
Синий и голубой	Синий: 0,006–0,030 Co_2O_3 , 0–1 CuO , 0,5–1,8 Co_2O_3 (для наклада). Голубой: 0,5–0,6 CuSO_4 , 0,001–0,002 Co_2O_3
Зеленый	0,03–0,05 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 0,1–0,2 CuO , 0,02–0,04 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$
Желтый	1,2–2,4 CeO_2 , 2,4–4,8 TiO_2 . Оптимальное соотношение $\text{CeO}_2 / \text{TiO}_2 = 1 : 2-1 : 3$ 2–5 Na_2SO_4 , 0,6–1,2 древесного угля
Красный, розовый	Селеновый рубин: 0,04–0,08 Se , 1,1–2,0 CdS . Состав стекла, %: 65–68 SiO_2 , 11–15 Na_2O , 2–5 K_2O , 10–12 ZnO , 2–3 B_2O_3 . Медный рубин: 0,4–1,0 CuO , 0,4–1,0 Cu_2O , 0,5–0,6 SnO , 0,3–0,7 винного камня. Состав стекла, %: 70,5–74,8 SiO_2 , 4,0–6,6 CaO , 0,5–4,4 BaO , 1,0–3,5 PbO , 15,5–16,0 Na_2O , 0–2 B_2O_3 . Розалин: 0,04–0,20 Se . Неодимовый рубин: 0,01–0,03 Se , 0,8–1,5 Nd_2O_3

Цветовая гамма существенно расширяется при использовании соединений редкоземельных элементов. Оксид неодима придает стеклу фиолетовый цвет, оксид эрбия – розовый, оксид

празеодима – зеленый. Расширение гаммы цветов достигается при использовании редкоземельных элементов в сочетании с другими красителями.

Глушеные стекла можно получить при использовании соединений фтора, фосфора, сульфида цинка. Составы глушеных и сульфидно-цинковых стекол приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Составы глушеных и сульфидно-цинковых стекол

Тип стекла	Содержание оксидов, %									
	SiO ₂	CaO	ZnO	Na ₂ O	K ₂ O	ZnS	B ₂ O ₃	S ²⁻	Na ₃ AlF ₆	P ₂ O ₅
Глушенное фтором	69	6	5,5	4,5	–	–	–	–	15	–
Глушенное фосфором	65	1	6	7	12	–	4	–	–	5
Сульфидно-цинковое	73 68,3	9,0– 4,9	– 8	17 16	– –	1–4*	– 1,1	– 1,7	– –	– –

* Ввод за счет SiO₂ или сверх 100%.

Для получения цветных глушеных и сульфидно-цинковых стекол вводятся те же красители, что и для получения прозрачных стекол, но в более высоких концентрациях.

Для варки цветных и глушеных стекол используют горшковые и ваннные печи непрерывного и периодического действия. Наиболее распространены секционные и малогабаритные обычные печи, а также печи прямого нагрева. Освоена варка селенового рубина, а также некоторых стекол насыщенных цветов, глушеных стекол в электрических печах с молибденовыми электродами.

Температурный режим варки и выработки цветных стекол зависит от вида применяемого красителя. Стекла, содержащие оксиды кобальта (II), никеля (II), железа (II) (синее и дымчатое стекло), обладают меньшей теплопрозрачностью и требуют температуры варки около 1490°C. Выработка изделий из этих стекол из-за большой скорости твердения также проводится при высоких температурах. Другие стекла (например, окрашенные соединениями марганца, оксида церия (IV), селеновый рубин) можно варить при температуре 1400–1450°C.

3.3. Сырьевые материалы в производстве сортового стекла

Сырьевые материалы для производства стеклоизделий условно делят на две группы: основные и вспомогательные.

Основные материалы содержат оксиды, образующие основу стекла и определяющие его свойства. Вспомогательные материалы представляют собой вещества, которые вводятся для изменения характеристик стекла и ускорения процесса стекловарения (красители, обесцвечиватели, глушители, окислители и восстановители, ускорители варки). Сырьевые материалы также разделяются на природные и синтетические. В производстве сортового стекла в основном применяют синтетические материалы: кальцинированную соду (карбонат натрия), поташ (карбонат калия), свинцовый сурик и глет, красители и др. Из природных материалов, как правило, используются высококачественные кварцевые пески. Качество сырьевых материалов (химический и гранулометрический составы, примеси и т. п.) регламентируются соответствующими государственными стандартами и техническими условиями, которые периодически пересматриваются и уточняются.

Основные материалы.

Кремнеземсодержащие материалы. Основным материалом для ввода в стекло SiO_2 является кварцевый песок. Качество песков оценивают по их химическому и зерновому составу. Главное требование к пескам – максимальное содержание SiO_2 и минимальное содержание окрашивающих примесей. Для стекловарения применяют пески, содержащие не менее 95% кремнезема и регламентируемое количество окрашивающих примесей, среди которых наиболее распространенными являются оксиды железа, а также титана, хрома и ванадия. В песках могут содержаться также оксиды титана и хрома. В табл. 3.7 приведен химический состав песков наиболее крупных месторождений СНГ и Украины.

В производстве свинцового хрусталя применяют обогащенные кварцевые пески высшего сорта с содержанием оксидов железа 0,01–0,02%. Пески с повышенным содержанием примесей обогащают, чтобы получить содержание примесей в указанных количествах. Содержание в песках красящих примесей при производстве сортовых изделий не должно превышать, %: V_2O_5 – 0,05; TiO_2 – 0,05; Cr_2O_3 – 0,0001; сульфидов 0,010–0,001.

При варке стекла важно учитывать количественное соотношение зерен по размерам. В производстве стеклянной тары и сортовой посуды рекомендуется применять кварцевые пески, в которых содержание фракций размером 0,1–0,5 мм составляет 85–90%. Для ускорения процесса стеклообразования необходимы мелкие пески с равномерным гранулометрическим составом. Для ускорения процесса варки лучше применять песок с зернами остроугольной формы, так как в этом случае увеличивается реакционная поверхность по сравнению с зернами сферической формы.

Таблица 3.7

Химический состав песков

Месторождение	Содержание, мас. %							П. п. п.
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O + K ₂ O	
Егановское (Московская обл.)	98,6–99,5	–	0,092–0,13	0,076	–	–	–	–
Ташлинское (Ульяновская обл.)	99,3–99,7	0,16–0,40	0,02–0,15	Следы	0,06	0,03	0,14	0,1
Новоселковское (Харьковская обл.)	98,0–99,1	0,39	0,04–0,10	–	0,2	0,04	–	0,2
Авдеевское (Донецкая обл.)	96,5–98,1	0,27–1,70	0,11–0,53	Следы	0,28–0,76	0,04–0,14	0,2–0,3	–

Для ввода SiO₂ можно также использовать природный кварц, содержащий незначительные количества примесей оксидов железа.

Глиноземсодержащие материалы. Добавка Al₂O₃ в натрий-кальций-силикатные стекла снижает температурный коэффициент линейного расширения, повышает химическую устойчивость, улучшает механическую и термическую прочность. В производстве стеклотары для ввода Al₂O₃ обычно применяют многокомпонентные глиноземсодержащие материалы. В большинстве случаев для ввода Al₂O₃ используют концентраты полевошпатовых и нефелиновых горных пород.

В сортовые стекла Al₂O₃ вводят чаще всего с техническим глиноземом и иногда с гидратом глинозема Al(OH)₃ для снижения кристаллизационной способности стекол.

Борсодержащие материалы. Введение в состав стекла незначительного количества (до 2%) оксида бора значительно облегчает варку и осветление стекла, снижает температуру варки, улучшает его физико-химические свойства.

Оксид бора вводят с борной кислотой H_3BO_3 , бурой $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ и боратом кальция. Массовое соотношение борного ангидрида и оксида кальция в борате кальция составляет 1,22–1,24.

Натрийсодержащие материалы. Основными материалами для ввода в стекло оксида натрия являются карбонат натрия, сульфат натрия и селитра (нитрат натрия). Карбонат натрия содержит 58,5% Na_2O и 41,5% CO_2 , температура его плавления 854°C . Технический карбонат натрия для производства стекла должен содержать не менее 95% Na_2CO_3 и не более 1% NaCl . В производстве сортовой посуды содержание Fe_2O_3 ограничивается: не более 0,01–0,02%. Частичным заменителем карбоната натрия может служить сульфат натрия, который обычно применяют в производстве стеклянной тары. С Na_2SO_4 можно вводить до 30% общего количества щелочных оксидов. Температура плавления сульфата натрия – 884°C . Разложение Na_2SO_4 происходит при температуре 1200–1220 $^\circ\text{C}$ с большим трудом.

Оксид натрия частично можно ввести и с горными породами, используемыми для ввода других оксидов, например Al_2O_3 (нефелины, полевые шпаты, трахиты и т. п.).

Натриевую селитру применяют для ввода от 1 до 6% Na_2O . Роль натриевой селитры определяется ее окисляющим действием. Из-за более высокой стоимости селитры по сравнению со стоимостью другого натрийсодержащего сырья ее применение ограничено.

Калийсодержащие материалы. Оксид калия, введенный в натрий-кальций-силикатное стекло взамен оксида натрия, улучшает его оптические и выработочные свойства, химическую устойчивость, цветовые характеристики. Сырьем для ввода K_2O являются поташ (карбонат калия) и селитра. Для повышения качества стекла необходимо, чтобы содержание в поташе красящих примесей и сульфата калия было минимальным. Так, при варке свинцового хрусталя, когда вводят 12–15% K_2O с поташом, содержание оксидов железа в поташе не должно превышать 0,002–0,003%, оксидов хрома – 0,0005%, а сульфат калия вовсе недопустим.

Нитрат калия (селитру) применяют как окислитель для введения от 1 до 6% K_2O .

Кальцийсодержащие материалы. Оксид кальция, ускоряя реакции силикатообразования, облегчает варку и осветление стекла, улучшает выработочные свойства и повышает его химическую устойчивость. Оксид кальция вводится обычно с карбонатом кальция CaCO_3 , содержащим 56% CaO и 44% CO_2 . Из минералогических

разновидностей карбоната кальция на стекольных заводах применяют известняк, мел, мрамор и известковый шпат. В этих минералах содержится до 90–98% CaCO_3 , остальную часть составляют примеси (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 и органические вещества). CaO вместе с MgO можно вводить с доломитом $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$.

При производстве сортовой посуды содержание оксидов железа в меле и доломите не должно быть более 0,04%. Однако некоторые месторождения мела, известняка и доломита характеризуются примесями оксида железа до 0,3%, что отражается на колере сортовых стекол.

В составы высококачественных стекол рекомендуется вводить оксид кальция с боратом кальция.

Магнийсодержащие материалы. Оксид магния улучшает кристаллизационные свойства стекла, снижает ТКЛР, повышает механическую прочность. В качестве сырья для введения в стекло обычно используют доломит $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$. Природные доломиты всегда содержат примеси песка, глинозема и железа. Постоянство состава и минимальное содержание вредных примесей (соединений железа) имеет важное значение для производства сортовой посуды и обесцвеченной стеклотары.

В качестве материалов для ввода MgO могут быть также применены (при условии постоянства состава) магнезит MgCO_3 , доломитизированный известняк и др.

Стронцийсодержащие материалы. Оксид стронция при замене части щелочноземельных оксидов улучшает выработочные свойства и химическую устойчивость стекла. Можно вводить до 6% оксида стронция в стекло для обесцвеченных водочных бутылок, особенно малой вместимости. Оксид стронция можно ввести в стекло с карбонатом стронция SrCO_3 (стронцианитом) и сульфатом стронция SrSO_4 (целестином). Основное требование к этому сырью для производства обесцвеченной стеклотары – малое содержание оксидов железа.

Барийсодержащие материалы. При введении небольших количеств BaO ускоряется варка, улучшаются выработочные свойства, особенно при механизированном формовании. BaO улучшает их блеск, повышает показатель преломления и плотность. Для ввода в стекло оксида бария наиболее подходящим сырьем является карбонат бария BaCO_3 , могут также применяться нитраты и сульфаты. С карбонатом бария вводится 77,7% BaO , а с нитратом бария – 58,6% BaO .

Свинцоводержащие материалы. Оксид свинца является основным компонентом хрусталей и определяет их высокие оптические свойства.

Для введения в стекло PbO используют свинцовый сурик и свинцовый глет. При разложении сурика выделяется кислород, который осветляет стекломассу и поддерживает окислительную среду. Преимуществами использования свинцового сурика перед свинцовым глетом являются отсутствие примесей металлического свинца и минимальная возможность восстановления оксидов свинца.

Содержание красящих примесей в свинцоводержащем сырье должно быть минимальным: оксидов железа – не более 0,001%, соединений никеля, кобальта, меди – до 0,0001%.

Новым комплексным сырьем для ввода оксида свинца и кремнезема является силикат свинца с содержанием PbO – 70–71%; SiO_2 – 20–21%. Силикат свинца представляет собой продукт промышленной переработки свинцовых кеков, содержание красящих примесей в нем превышает допустимые пределы. Материал может быть рекомендован для производства цветных стекол.

Цинксоодержащие материалы. Добавка оксида цинка в стекло снижает термический коэффициент линейного расширения, увеличивает коэффициент преломления и химическую устойчивость. Оксид цинка является обязательным компонентом сelenового рубинового стекла. Для введения в состав шихты оксида цинка используют цинковые белила (промышленное название оксида цинка).

Вспомогательные материалы.

Красители и обесцвечиватели. Наибольшую группу вспомогательных материалов представляют красители, которые являются соединениями различных металлов и распределяются в стекле на ионном, молекулярном и коллоидном уровнях. Малые количества некоторых красителей служат физическими обесцвечивателями.

Глушители. Для глушения обычно применяют фториды и фосфаты. Соединения фтора могут быть введены с фторидом кальция CaF_2 , кремнефторидом натрия Na_2SiF_6 , криолитом $3NaF \cdot AlF_3$ и хиолитом $5NaF \cdot AlF_3$. Соединения фосфора применяют в виде костной муки, фосфата кальция $Ca_3(PO_4)_2$, гидрофосфата натрия $Na_2HPO_4 \cdot nH_2O$, апатита $Ca_4(CaF)(PO_4)_3$ или $Ca_4(CaCl) \cdot (PO_4)_3$. Учитывая, что соединения фтора загрязняют окружающую среду, за последние годы более широко стали применять глушение стекла соединениями фосфора. Заглушенность стекол также достигается

за счет кристаллизации соединений (например, ZnS в группе туше-ных сульфидноцинковых стекол), а также введения в сваренную стекломассу тугоплавких соединений (Al_2O_3 , ZrO_2) или пузырьков газов N_2 , O_2 . Реже для глушения используют соединения олова (SnO , SnO_2 , $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), мышьяка (As_2O_3) и сурьмы (Sb_2O_3). Глушение может быть также достигнуто применением составов стекол, склонных к ликвации.

Окислители и восстановители. Применяют при варке стекла для создания окислительных или восстановительных условий. При производстве свинцового хрусталя необходимо создать окислительные условия для предотвращения восстановления оксидов свинца. Окислительная среда играет важную роль при обесцвечивании сортовых и тарных стекол, повышении теплопрозрачности стекла в механизированном производстве стеклотары.

В качестве окислителей применяют нитраты (NaNO_3 , KNO_3), оксиды мышьяка, марганца, церия и др. При варке тарных стекол с сульфатом натрия восстановители вводят для ускорения разложения Na_2SO_4 и окрашивания в янтарный цвет. Восстановительные условия создают при варке медного рубина.

В качестве восстановителей используют углеродсодержащие вещества (опилки, уголь, мазут), соединения олова, виннокаменную соль.

Ускорители. Среди ускорителей варки стекла особое место занимают фториды, которые способствуют появлению жидкой фазы при более низких температурах и увеличивают скорость процесса силикатообразования. Фториды снижают температуру завершения реакций силикатообразования на $100\text{--}200^\circ\text{C}$. Считается, что добавка $0,5\text{--}1,0\%$ фтора ускоряет процессы гомогенизации и осветления стекла на $15\text{--}18\%$. В качестве ускорителя варки обычно применяют кремнефторид натрия Na_2SiF_6 .

Однако фториды разрушают огнеупорный материал стекловаренных печей. При содержании более $1,5\%$ они усиливают кристаллизацию стекломассы и вследствие сильной летучести вместе с дымовыми газами поступают в окружающую среду. Следовательно, применение фторидов требует правильной оценки экономических факторов и факторов охраны окружающей среды.

Ввод $1,5\%$ B_2O_3 , гидроксида натрия и калия, окислителей ускоряет процесс варки на $15\text{--}16\%$. К числу ускорителей варки можно также отнести осветлители, которые при высоких температурах способствуют освобождению стекломассы от крупных и мелких пузырей.

Некоторые основные компоненты шихты (например, сульфат натрия, селитра) являются осветлителями. Другие осветлители (например, оксиды мышьяка, сурьмы, церия, хлорид натрия, фториды) вводят в состав шихты специально. Для бесцветных сортов стекол сульфат натрия не является основным компонентом шихты. Небольшие добавки его (до 0,5%) специально вводят в состав шихты для улучшения осветления стекломассы. В зависимости от состава стекла и съемов стекломассы вводят 0,05–0,50% оксидов мышьяка и сурьмы. Хлорид натрия вводят в шихту в количестве 0,5–1,0%. В качестве ускорителей применяют также соли аммония: нитраты NH_4NO_3 , сульфаты $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, хлориды NH_4Cl в количестве 0,25–1,00% массы шихты.

Стекольный бой. Стекольный бой образуется на различных стадиях получения и переработки изделий из стекла как неизбежные отходы (например, отрезка колпачка сформованных изделий, растрескивания при отжиге, в ходе сортировки и упаковки и др.). Традиционно его повторно используют в качестве важного компонента стекольной шихты. В производстве сортового стекла применяют только бой стекла того же состава, что и стекломасса, получаемая из шихты. Чаще всего – это бой своего же производства (собственный), традиционно составляющий 50–60% в зависимости от способа формования. Собственный собирается с различных переделов производства, транспортируется на сборный пункт, сортируется с удалением посторонних предметов и загрязнений.

Введение обратного боя имеет следующие последствия:

1) интенсификация процесса варки, поскольку на плавление боя затрачивается меньше тепла, чем на плавление шихты; в итоге может быть увеличена производительность печи;

2) энергосбережение: подсчитано, что введение 10% стеклобоя позволяет экономить около 2,5% топлива;

3) сокращение расхода сырья: стеклобой следует рассматривать как комплексный сырьевой материал, содержащий все основные оксиды, входящие в состав стекла. Особенно важное значение имеет содержание в нем до 16–17% щелочных оксидов, что позволяет экономить дорогостоящую соду.

4) снижение воздействия стекольных производств на экологическую обстановку.

Помимо этого следует отметить еще два важных момента:

1) обратный бой следует рассматривать как сырье, требующее специальной подготовки, а также введения в печь в составе шихты,

но не отдельно, как это еще делается на ряде отечественных предприятий. Отдельно (от шихты) вводимый бой, влияя на изменение формовочных и термомеханических свойств стекла, снижает стабильность указанных свойств;

2) важнейшее значение для технологии имеет не количество вводимого боя (вторичный фактор), а постоянство соотношения бой – шихта в любой момент загрузки. Именно нарушение принятого соотношения и создает проблемы, приписываемые увеличенному введению боя.

За рубежом практикуется введение шихты боя стекла непосредственно в смеситель на стадии смешивания сырьевых компонентов. При этом подготовленный бой хранится в бункере дозирочно-смесительной линии и дозируется в смеситель за одну минуту до конца цикла смешивания, что достаточно для достижения однородности смеси. В этом случае требуется более тщательное предварительное измельчение стеклобоя: размер кусков не должен превышать 10 мм.

Точное соотношение бой – шихта достигается при условии их дозирования по массе, которое может осуществляться как непрерывно, так и периодически.

! 3.4. Подготовка сырьевых материалов и шихты

Сырьевые материалы для приготовления шихты должны быть соответствующим образом подготовлены (обогащены, растарены, измельчены, высушены и просеяны).

Очевидно, что полная подготовка сырьевых материалов на каждом стекольном предприятии нецелесообразна, так как усложняет компоновку складов и составного цеха, увеличивает себестоимость продукции, ухудшает условия труда и экологическую обстановку. Целесообразнее готовить и обогащать сырьевые материалы на централизованных базах, в местах их добычи. На стекольные заводы при этом поступает обогащенное сырье постоянного химического состава, что позволит стабилизировать технологические процессы варки и выработки изделий и улучшить их качество. В этом случае в условиях стеклозавода вместо составного цеха с полной подготовкой сырьевых материалов организуется дозирочно-смесительное отделение, а процесс составления шихты полностью автоматизируется.

В качестве примера можно привести технологию централизованной подготовки песка для стекольной промышленности. Процесс реализуется непосредственно на карьере и включает следующие операции: сортирование (просев) исходных песков, дезинтеграцию и удаление крупных фракций, механическую или акустическую оттирку первичных шламов и пленок гидроксидов железа, удаление шлама с выделением в отвал частиц размером 0,1 мм, флотацию с применением анионных реагентов, обезвоживание, фильтрацию и сушку флотационного концентрата с последующей упаковкой в биг-бэги.

Таким образом, для корректного приготовления шихты необходимо применять обогащенные и подготовленные материалы; точно отвешивать сырьевые материалы по рассчитанному составу шихты; тщательно перемешивать сырьевые материалы до полной однородности; подавать и загружать шихту, исключая возможность ее расслоения.

Для производства сортового стекла задача существенно облегчается, поскольку в основном используется синтетическое, а значит, чистое сырье стабильного состава.

Основное требование к шихте – высокая степень однородности. Однородная шихта облегчает процесс стекловарения и исключает ряд пороков и дефектов в готовом стекле и стеклоизделиях. Для обеспечения однородности шихты важное значение имеют ее влажность и зерновой состав сырьевых материалов. Зерна сырьевых материалов должны иметь определенный размер, так как от этого зависит возможное расслоение шихты и равномерность растворения при варке. При одинаковом размере зерен компонентов шихта расслаивается тем больше, чем крупнее зерна. Небольшое количество влаги (3–5%) благоприятно влияет на однородность шихты. Воду, как правило, подают непосредственно в смеситель, ранее чаще увлажняли песок после подачи его в смеситель.

Получение, контроль и транспортировка шихты.

Отвешивание и смешивание материалов. На стекольных заводах для отвешивания сырьевых материалов используют весы разнообразных конструкций. По принципу действия весы бывают стационарными, отвешивающими только один сырьевой материал; подвижными, отвешивающими все материалы поочередно (весы-тележка, весы на монорельсе); стационарными автоматическими и полуавтоматическими, отвешивающими все сырьевые материалы поочередно (весы снабжены бункером, в который подаются

материалы из расходных бункеров); автоматическими, устанавливаемыми под каждым бункером.

В настоящее время на крупных заводах сырьевые материалы отвешивают на автоматических весах, причем весы, транспортные средства и смеситель связаны системой автоматики, обеспечивающей их синхронную работу. Взвешенные в соответствии с рецептом шихты сырьевые материалы перемешивают в смесителях. Контейнерные смесители исключают операцию выгрузки шихты. Их целесообразно применять при малом объеме производства и варке небольших количеств различных стекол (например, при варке окрашенных стекол в горшковой печи, свинцового хрусталя и т. п.).

Для приготовления шихты при механизированном производстве применяют тарельчатые смесители. В смесителях типа СТ сырьевые материалы через приемную воронку загружают на вращающуюся чашу-тарелку. Перемешивание материалов осуществляется при одновременном вращении чаши-тарелки и установленных с эксцентриситетом по отношению к оси смесителя лопастей или катков, имеющих самостоятельный привод. На стекольных заводах цикл смешивания в тарельчатых смесителях автоматизирован.

В автоматизированных линиях приготовления шихты применяется линейная система расположения бункеров сырьевых материалов, под которыми расположены стационарные автоматические весы. Из расходных бункеров сырьевые компоненты после взвешивания на автоматических весах ссыпаются сборочным конвейером в бункер рукавного переключателя, из которого попадают в один из смесителей, где они перемешиваются и увлажняются. Из смесителя шихта выгружается в бункер шнека и транспортируется элеватором, который пересыпает ее в расходные бункера, откуда она транспортируется к механизированному загрузчику стекловаренной печи вагонетками или транспортером. Возможна башенная компоновка дозировочно-смесительного отделения, при которой материалы после каждого отвеса направляются непосредственно в смеситель, что позволяет избежать лишней транспортировки шихты и пыления.

На заводах, выпускающих небольшие партии бытовых изделий из различных стекол, для приготовления шихты целесообразно использовать контейнеры. Шихту с применением контейнеров можно приготовить на поточной линии. В этом случае контейнеры последовательно проходят первый и второй весовые участки и участок ручного ввода малых добавок (красители, обесцвечиватели и т. п.).

Далее контейнеры подаются на участок смешивания шихты, закрепляются в специальных устройствах, вращаются в течение определенного времени, после чего транспортируются к стекловаренной печи.

Контроль качества шихты. Готовую шихту контролируют на соответствие заданному химическому составу, влажность, однородность. Допустимые отклонения от заданного состава компонентов в отдельных отвесах не должны превышать следующих значений: песка, соды, поташа $\pm 1\%$, карбонатов кальция и магния, сурика, глета, влаги $\pm 0,5\%$. При работе автоматизированных линий требования к составам компонентов шихты ужесточаются, что вызывает необходимость применения кондиционных сырьевых материалов. Применение быстродействующих рентгеновских анализаторов для экспресс-анализа шихты и стекла в сочетании с компьютерной системой расчетов состава позволяет создать систему управления качеством шихты. Все расчеты проводятся на основе вводимых в компьютер данных о химическом составе стекла и компонентах шихты, их количестве, влажности, точности дозирования. При этом коррекция рецепта шихты должна проводиться при изменении состава сырьевых материалов с учетом того, что допустимые колебания содержания оксидов в стекле не должны превышать $0,2\text{--}0,3\%$.

Дозирование компонентов шихты. Дозированием называют процесс взвешивания отдельных сырьевых компонентов порциями с заданной массой. Эффективность этого процесса занимает центральное место в технологии приготовления стекольных шихт. Под эффективностью в данном случае понимают точность дозирования при высокой производительности и обеспечение стабильности процесса.

Для различных видов стекла допустимые отклонения в содержании основных компонентов составляют $0,1\text{--}0,3\%$ (по массе). Отклонения больше допустимых приводят к нестабильности варочных, выработочных и физико-химических свойств стекол и изделий из него. Известно, что до 60% брака в производстве изделий из стекла связано с неоднородностью химического состава шихты. Для достижения однородности стекломассы, сваренной из такой шихты, требуются дополнительные затраты топлива в период ее варки.

Процесс дозирования может быть непрерывным и дискретным. При непрерывном дозировании обеспечивается высокая производительность, однако достигаемый уровень точности не превышает

2–3% от массы заданной дозы. Поэтому для приготовления стекольной шихты используются только системы дискретного дозирования.

Функциональная схема весового дозатора дискретного действия приведена на рис. 3.1. Из расходного бункера 1 сырье с помощью загрузочного питателя 2 подается в весовой бункер 3. Масса загруженной дозы фиксируется массоизмерительным устройством 6, после чего отдозированный материал выгружается на сборочный транспортер 5 с помощью разгрузочного питателя 4.

В последнее время системы измерения массы материала претерпели существенные преобразования, причем их совершенствование протекает по двум направлениям:

- изменение способов измерения массы;
- преобразование сигнала о массе дозируемого материала.

Революционные преобразования систем измерения массы произошли при внедрении тензорезисторных датчиков, способных преобразовывать информацию о массе груза в непрерывный электрический сигнал.

Функциональная схема тензометрического дозатора представлена рис. 3.2. Обращает на себя внимание отсутствие рычажной системы. Основным элементом системы является массоприемное устройство 10. Весовой бункер 2 под действием массы загружаемого в него материала несколько опускается, нажимая на гибкий элемент (стальную пластину), к которому крепится тензорезисторный датчик, фиксирующий степень механической деформации пластины. Датчик является звеном электрической цепи (резистор), сопротивление которого меняется при деформации гибкого элемента. В итоге в цепи возникает электрический импульс, величина которого пропорциональна массе загруженного в весовой бункер материала. Его значение нормируется преобразователем 11, после чего сигнал приходит в микропроцессорный контроллер 14,

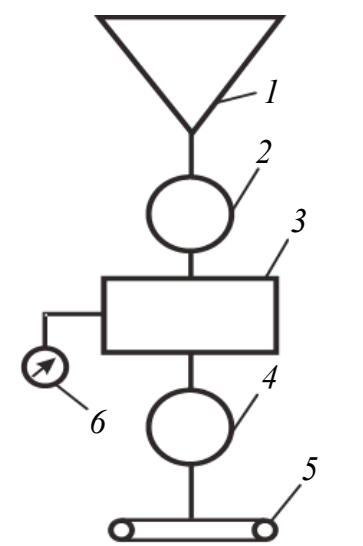


Рис. 3.1. Функциональная схема дозатора:

- 1 – весовой бункер;
- 2 – загрузочный питатель;
- 3 – весовой бункер;
- 4 – разгрузочный питатель;
- 5 – конвейер;
- 6 – массоизмерительное устройство

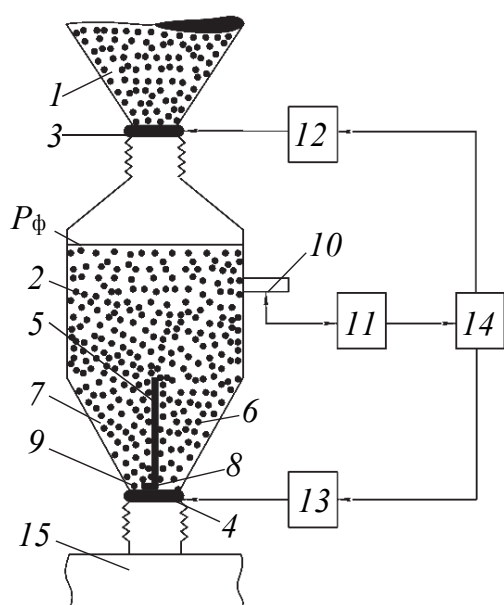
который управляет пускателями загрузки 12 и разгрузки 13 весового бункера. Величина сигнала непрерывно сравнивается с заданным значением. После набора дозы прекращается загрузка материала в весовой бункер и начинается его разгрузка.

Дозаторы с тензорезисторными датчиками обеспечивают высокую точность дозирования (погрешность менее 0,2%) при

высоких производительности и надежности. Они способны обеспечить различные варианты компоновки дозировочно-смесительных линий при возможности разгрузки материалов либо на ленту конвейера, либо непосредственно в смеситель.

В последнее время разработаны весовые тензометрические дозаторы с консольной установкой грузоприемного устройства. Дозатор в этом случае состоит из питающего устройства (шнекового, гравитационного, вибрационного), весового бункера, пневматизатора, гибкого элемента с силоизмерительным датчиком. Бункер дозатора подвешен консольно на гибком элементе. Для предотвращения зависания сыпучих материалов на бункере установлены пневмопобудители.

Следует отметить, что значительные достижения в совершенствовании техники дозирования обусловлены также



и их использование в системах управления процессом шихтоприготовления обусловило прорыв в этой области.

Микропроцессорные системы выполняют контроль режимов дозирования, самодиагностику и автоматическую коррекцию системы, а также сопряжение с ЭВМ, которая осуществляет управление работой дозирочно-смесительной линии. На микропроцессор возлагаются регистрация документов, обработка данных автоматизированного анализа состава материалов, учет динамики дозирования, гибкое изменение массы устанавливаемой дозы, расчет технико-экономических показателей.

Микропроцессорное управление делает еще более надежной и дешевой систему управления дозирочно-смесительной линией, упрощает обслуживание.

Таким образом, внедрение новых систем управления и тензометрических датчиков позволило существенно упростить конструкцию весовых устройств, поскольку она не требует наличия рычажной системы измерительных головок и призм, является фактически бесходовой и, следовательно, пылезащитной. Современные весовые дозирочные комплексы обладают системами самоконтроля, обеспечивают автоматизированный учет массы тары, автоматически контролируют и регулируют точность дозирования, статистически обрабатывают результаты дозирования. Предусмотрены удобный и надежный ввод и вывод данных, возможность визуальной и документальной оценки результатов, сопряжение с внешними управляющими устройствами. Совершенствуется программное обеспечение процесса управления дозированием, повышается надежность и снижается стоимость систем управления.

Смешивание компонентов стекольных шихт. Отвешенные в соответствии с заданным шихтовым составом компоненты подаются в смеситель для достижения однородности их смеси. Стадия смешивания имеет большое значение, поскольку гомогенность стекломассы является решающим признаком качества изделий. Помимо этого, высокая гомогенность шихты позволяет снизить затраты на варку стекла.

Для быстрого достижения и сохранения однородности шихты при смешивании необходимо соблюдать следующие правила:

- сырьевые материалы должны иметь как можно более близкий гранулометрический состав. Одинаковая величина зерен позволяет снизить роль расслоения – решить одну из основных проблем, связанных с порошковым способом подготовки шихт;

– необходимым является увлажнение шихты, с тем чтобы снизить эффекты ее пыления и расслоения при транспортировке и загрузке в печь. Кроме того, доказано, что содержание влаги 1,5–2,0% в шихте способствует ускорению реакций силикато-, а значит, и стеклообразования.

Существует два принципиально различных типа смесителей:

- а) периодического действия;
- б) непрерывного действия.

В производстве стекольных шихт используются только первые, поскольку машины непрерывного действия не обеспечивают равномерного распределения компонентов по объему замеса, т. е. ее однородности.

В свою очередь, смесители периодического действия разделяются на две группы:

- гравитационные;
- принудительного действия.

Наибольшее распространение в стекольной промышленности получили тарельчатые смесители, относящиеся к смесителям принудительного действия. В них имеются вращающиеся вокруг вертикальной оси смесительные приспособления (мешалки), которые заставляют частицы материала перемещаться во всех измерениях по сложным траекториям. В таких смесителях не может происходить расслоение шихты, что имеет место при ее свободном падении, кроме того, агломерация частиц подавляется под механическим воздействием мешалок.

За рубежом широко используются тарельчатые смесители Эйриха противоточного типа (рис. 3.3). Такие смесители могут иметь от одной до четырех мешалок, располагаемых эксцентрично в чаше (тарелка с бортом).

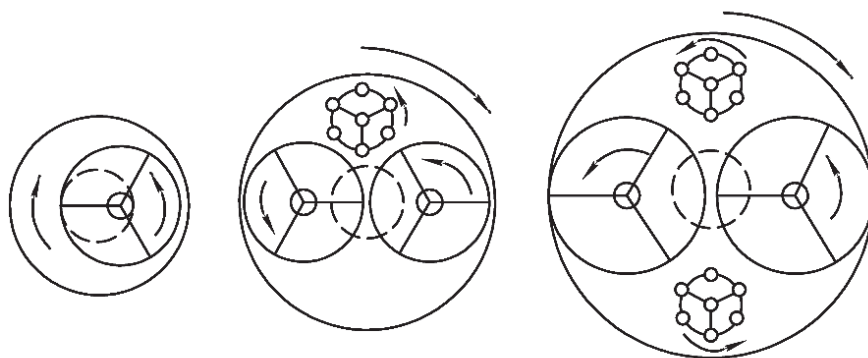


Рис. 3.3. Разновидности смесителя Эйриха

Направления вращения тарелки и крестовин противоположны. При этом малые мешалки осуществляют подачу материала к большим и вращаются быстрее последних. Важным является соотношение числа оборотов тарелки и основных мешалок. При значении этого соотношения 1 : 5 достигаются оптимальные условия перемешивания. Емкость чаши таких смесителей варьирует в широких пределах: от 0,003 до 10,000 м³. При работе смесителя частицы шихты совершают движения по сложным траекториям, что обеспечивает быстрое достижение гомогенности смеси.

Для смесителей различных типов время перемешивания изменяется от 2,5 до 4,0 мин. Продолжительность перемешивания определяется эффективностью перемешивающего устройства, физико-механическими свойствами сырьевых материалов, последовательностью загрузки и увлажнения песка и других компонентов стекольной шихты. В то же время скорость вращения мешалок должна быть оптимизирована и обычно определяется путем пробных испытаний. Слишком быстрое движение материала может приводить к расслоению, а слишком малая скорость перемешивания – к снижению производительности смесителя.

Как сказано выше, увлажнение шихты производится на стадии ее смешивания. Его осуществляют чаще всего путем объемного дозирования воды и подачи ее в смеситель с помощью разбрызгивающих устройств. Наиболее целесообразно устанавливать в смесителе форсунки, а дозирование воды для увлажнения шихты осуществлять с помощью центробежных насосов, включение и отключение которых производится автоматически. Достигаемая при этом точность дозирования воды составляет около 0,5%.

Возможны следующие варианты увлажнения:

- предварительное увлажнение кварцевого песка и последующая подача в смеситель остальных компонентов;
- увлажнение шихты после предварительного ее смешивания в сухом виде.

Последний способ в настоящее время считается более целесообразным и включает цикл перемешивания сухой смеси в течение 20% от общей продолжительности перемешивания. Затем следует цикл подачи воды (30% от общего времени). В оставшееся время осуществляется стадия перемешивания влажной шихты, что существенно улучшает качество данного процесса.

Типы дозирочно-смесительных линий. Работа современных дозирочно-смесительных линий (ДСП) может быть организована по следующим технологическим схемам:

– линейная (горизонтальная) компоновка, при которой бункеры сырья располагаются в одну линию, а дозирование компонентов стекольной шихты осуществляется с помощью однокомпонентных тензометрических весовых дозаторов, работающих по принципу набора полной либо нескольких частичных доз, что обеспечивает снижение суммарной погрешности дозирования, а уменьшение габаритов дозаторов позволяет легко встраивать их в действующие ДСЛ (рис. 3.4, а).

Использование ДСЛ с горизонтальной компоновкой обуславливает необходимость установки большого количества дозаторов, в пределе – под каждым бункером, требует длинных транспортных путей и, как следствие, больших производственных площадей. Преимущество подобных установок состоит в том, что возможно производство сразу нескольких шихт по различным рецептам, а также большая производительность линий многокомпонентной шихты (200–400 т/сут). Горизонтальная компоновка нового составного цеха чаще используется при перепрофилировании неработающих или недостроенных заводов по производству железобетонных изделий, а также других предприятий, имеющих производственные корпуса шириной 18–24 м, длиной 72–120 м и высотой до низа ферм 10,8–14,4 м.

При малой производительности составного цеха (до 80–100 т/сут) более предпочтительна вертикальная компоновка ДСУ (башенных установок), что значительно сокращает транспортные пути, а значит, уменьшает вероятность загрязнения сырья, а также снижает потребные производственные площади (рис. 3.4, б). Принцип башенной компоновки заключается в размещении по вертикали друг под другом бункеров (силосов) сырьевых компонентов стекольной шихты, одного-двух многокомпонентных тензометрических весовых дозаторов и смесителей. Повышение производительности подобных установок достигается за счет увеличения объема бункеров и высоты зданий (до 40 м). Башенные установки могут использоваться, например, в производстве парфюмерной или медицинской стеклотары.

Наиболее рациональным является третий тип компоновки технологического оборудования ДСЛ – вертикально-горизонтальный, что позволяет использовать различные варианты тензометрических дозаторов, располагаемых под расходными бункерами. Количество и объем бункеров определяются регламентируемым запасом сырья и количеством линий. Комбинированные ДСЛ оснащаются одним сборочным конвейером и несколькими многокомпонентными дозаторами, включая дозировочно-смесительный комплекс малых добавок.

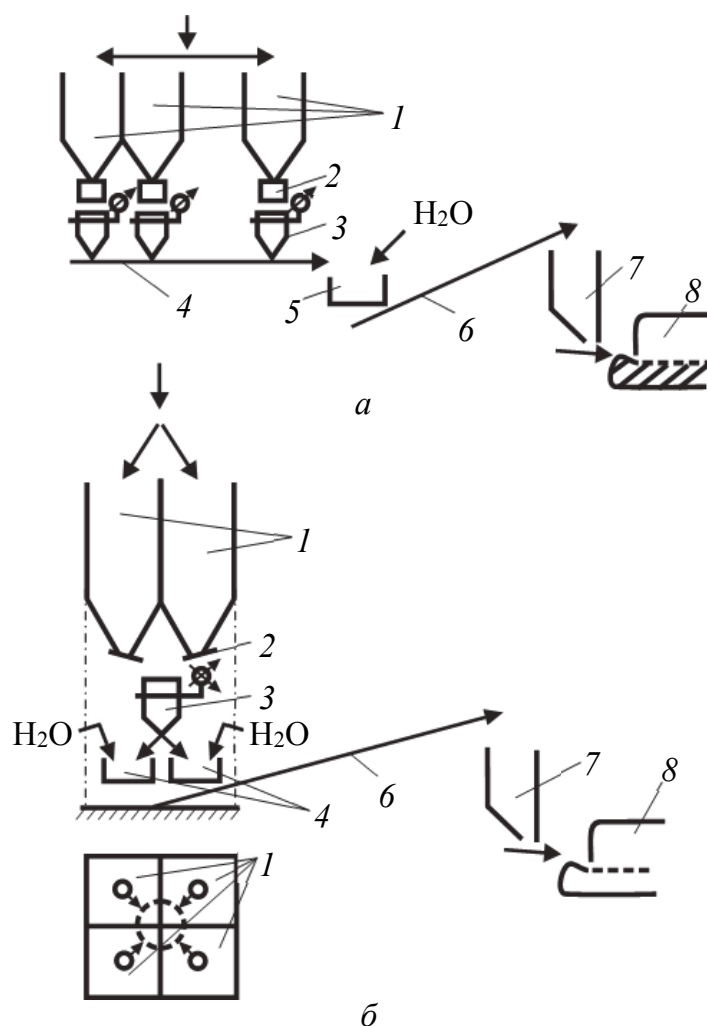


Рис. 3.4. Варианты компоновки ДСЛ:

а – линейная; б – башенная:

- 1 – расходные бункера; 2 – питатели; 3 – дозаторы;
 4 – сборочный конвейер; 5 – смеситель;
 6 – конвейер подачи шихты; 7 – бункер загрузчика; 8 – печь

Один из вариантов комбинированной компоновки оборудования ДСЛ представлен на рис. 3.5. Схема позволяет использовать как однокомпонентные, так и многокомпонентные тензометрические весовые дозаторы, расположенные под силосными банками, выполняющими роль расходных бункеров. Количество и вместимость силосов определяются исходя из 10–15-суточного запаса сырья.

Число расходных бункеров в составе ДСЛ обычно соответствует числу используемых сырьевых компонентов шихты. Кроме того, в линии могут устанавливаться резервные бункера с дозаторами. Компоненты с большим содержанием в шихте кварцевого песка, соды могут дозироваться сразу двумя весами. Малые шихтные

добавки иногда могут размещаться в бункерах небольшого объема, устанавливаемых над сборочным транспортером, и отвешиваться специальными дозаторами с малой производительностью. Их могут также хранить вне дозирочной смесительной линии и отвешивать на обычных торговых весах. К таким добавкам относится, например, крокус, введением которого в шихту обеспечивается стабильность содержания в ней оксидов железа, красителей, окислителей и др.

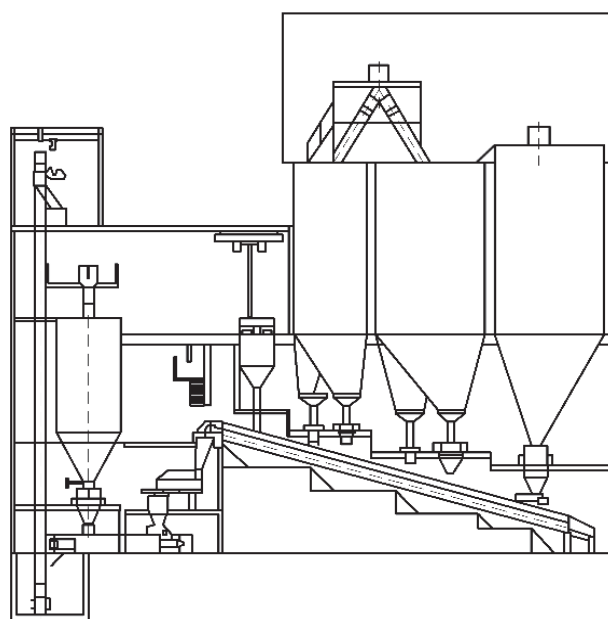


Рис. 3.5. Пример комбинированной ДСЛ

Способы транспортирования шихты к печи. Существует несколько способов транспортирования шихты к печи. Наиболее эффективным с точки зрения сохранения качества шихты является подача в контейнерах. При этом сохраняется та же степень однородности шихты, которая достигнута в смесителе. Однако такой способ требует большого количества контейнеров и мало приемлем при массовом производстве.

Подача шихты на открытом ленточном транспортере создает определенные удобства для отбора проб шихты на анализ, но приводит к ее высыханию, расслаиванию от сотрясения ленты и охлаждению. Кроме того, транспортеры не применимы при значительном удалении составного цеха от стекловаренной печи.

Рекомендуется подачу шихты в производство осуществлять в вагонетках или подвижных бункерах с тепловой изоляцией во избежание охлаждения шихты.

В последнее время делаются попытки применения пневмотранспорта для перемещения шихты. При этом для исключения характерных недостатков способа – расслоения шихты и износа трубопроводов транспортировка осуществляется в «плотном потоке» при концентрации материала более 200 кг/кг воздуха при относительно малой скорости – около 5 м/с.

При хранении и транспортировке шихты не должно быть резких сотрясений и падений с большой высоты, приводящих к ее расслаиванию. Не следует создавать больших запасов шихты, так как при длительном хранении она слеживается. В связи с этим на предприятиях часто ограничивают срок хранения шихты четырьмя часами.

Загрузка шихты в стекловаренную печь. Загрузка шихты в стекловаренные печи производится с помощью механических загрузчиков. В производстве сортовых изделий с наилучшей стороны зарекомендовали себя загрузчики шихты с подвижным секторным элементом. Данный тип загрузчика требует устройства закрытого загрузочного кармана печи. Этот тип загрузчика шихты включает водоохлаждаемый пустотелый секторный элемент, расположенный под небольшим загрузочным бункером. Данный элемент имеет изогнутую форму и движется по дуге с амплитудой порядка 45°. Когда эжектор отведен в заднее положение, выпускное отверстие загрузочного бункера открывается и шихта высыпается на поверхность бассейна стекломассы. При движении вперед секторный элемент продвигает шихту вглубь печи, в то время как выпускное отверстие загрузочного бункера перекрывается им. При движении секторного элемента назад выпускное отверстие вновь открывается, новая порция шихты высыпается на освободившееся пространство, и цикл повторяется.

Скорость загрузки шихты зависит от скорости движения секторного элемента, кроме того, его можно включать и выключать. Также возможна ручная регулировка амплитуды хода секторного элемента, а при помощи отсечной заслонки настраивается скорость расхода шихты из бункера.

Загрузка и проталкивание шихты в печь производятся одновременно, и в случае перебоя в подаче шихты процесс останавливается. В результате разбить шихту на отдельные мелкие порции сложно, особенно когда подача шихты интенсивная. Можно несколько исправить положение, если загрузчик будет поворачиваться вправо и влево на 5–10° для обеспечения загрузки шихты в разных направлениях.

На рис. 3.6 представлен полностью герметизированный загрузочный карман печи с установленным на нем загрузчиком с секторным элементом.

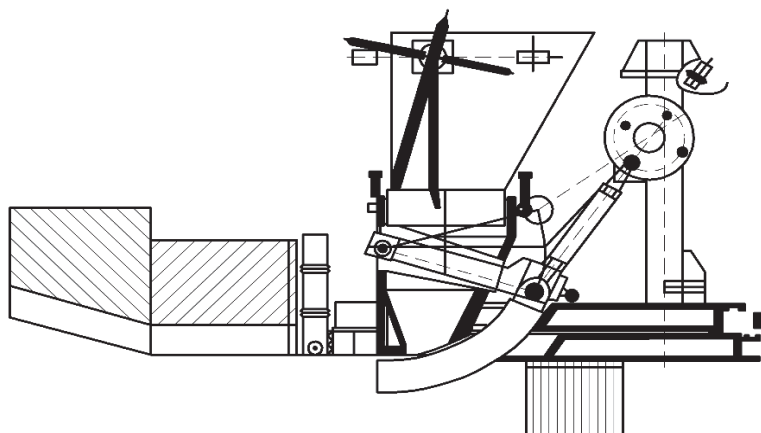


Рис. 3.6. Загрузчик шихты с секторным элементом

Этот тип загрузчика отличается компактными габаритами и крепится наверху небольшого загрузочного кармана. Вокруг загрузчика монтируются водоохлаждаемые конструкции, находящиеся в контакте с огнеупорами и потребляющие большой объем воды для охлаждения.

3.5. Основы стекловарения, конструкция и характеристика печных агрегатов для производства сортовых изделий

Общая характеристика стекловаренных печей, используемых в производстве сортовых изделий. Стекловаренная печь является основным теплотехническим агрегатом в производстве сортового стекла.

В качестве основных источников теплоты в печах могут использоваться природный газ, жидкое топливо или электроэнергия. В стекольной промышленности продолжает расти использование природного газа. Его преимуществами являются высокая чистота, легкость управления процессом, отсутствие необходимости в емкостях для его хранения. Также использование природного газа позволяет снизить выбросы оксида серы, однако при этом увеличиваются выбросы NO_x . Жидкое топливо применяется все реже. Его преимущество заключается в большей излучающей способности пламени жидкого топлива, оно обеспечивает более эффективную

передачу энергии расплаву. За рубежом многие печи оборудованы таким образом, чтобы использовать и природный газ, и жидкое топливо, а для смены топлива требуется только смена горелок. Во многих случаях снабжение газом в пиковые периоды может быть непостоянным, и это вызывает необходимость смены топлива. Вполне обычной также является практика применения жидкого топлива на одной-двух парах горелок печей, в основном использующих газ, для увеличения возможностей контроля поступающей теплоты.

Электроэнергия применяется для передачи теплоты стекломассе путем ее резистивного нагрева, когда ток проходит через стекломассу. Другие способы не нашли коммерческого применения. Электроэнергия может использоваться как единственный источник теплоты в печи и в комбинации с ископаемым топливом.

Типы, конструкции и размеры стекловаренных печей, эксплуатируемых в настоящее время для варки сортовых стекол различных составов и назначения, чрезвычайно разнообразны.

Классификация стекловаренных печей основывается на их конструктивных и технологических особенностях. Основными из них являются:

- вид теплоносителя;
- устройство рабочей камеры;
- тип теплообменного устройства;
- способ отопления;
- конструкция выработочной части печи;
- химический состав стекломассы.

Выделяют следующие основные типы печей для варки сортовых стекол:

- по способу обогрева:
 - а) пламенные;
 - б) электрические;
 - в) газозлектрические;
- по устройству рабочей камеры:
 - а) горшковые;
 - б) ванны;
- по способу использования теплоты отходящих газов:
 - а) рекуперативные;
 - б) регенеративные;
- по направлению пламени:
 - а) с подковообразным;
 - б) полуподковообразным.

Выбор типа печи для стекловарения определяется следующими факторами: производительность, состав стекла, экономические затраты, цены на топливо, наличие свободных площадей, существующая инфраструктура и др.

Следует отметить, что тип используемых печей в значительной степени определяется их производительностью. При малой производительности (до 30 т/сут) широкое распространение получили печи регенеративные и рекуперативные, электрические печи и печи с принудительным кислородным дутьем.

Для варки стекла в малотоннажном производстве сортовых изделий используются горшковые или ваннные печи периодического действия, которые относительно дешевы в строительстве и функционировании, однако характеризуются низкой энергоэффективностью, их КПД варьируется в пределах от 6 до 15%. В большинстве случаев в подотрасли сортового стекла преобладают ваннные регенеративные или рекуперативные печи производительностью от 6 до 15 т/сут и КПД – 17–28%.

Регенеративные печи являются наиболее эффективными по сравнению с другими, использующими газовое или жидкое топливо, поскольку могут обеспечивать очень высокую температуру подогрева воздуха (до 1400°C). В производстве сортовых стекол используются преимущественно регенеративные печи с подковообразным направлением пламени, которые имеют более высокую тепловую эффективность (выше на величину вплоть до 10%), но возможности управления горением в таких печах ограничены. Низкое энергопотребление регенеративных печей на тонну стекломассы приводит к снижению выбросов углекислого газа, однако более высокие температуры обуславливают увеличение доли NO_x . При этом строительство таких печей связано с высокими капитальными затратами, что в значительной степени оправдано лишь при больших объемах производства.

Из малых печей для варки стекол находят применение печи прямого нагрева. Они оборудуются металлическими рекуператорами, а выработочная часть таких печей имеет круглую, полукруглую или трапециевидную формы. Кроме того, рекуператоры используют для подогрева в стекловаренных печах рабочих (выработочных) частей.

Преимущества рекуперативных печей заключаются в равномерности предварительного подогрева воздуха, отсутствии переводов направления пламени, простоте обслуживания и относительно

небольшой площади размещения. Вместе с тем эти печи имеют и недостатки, связанные с низкой степенью подогрева воздуха, возможностью работы металлических рекуператоров лишь при низких температурах отходящих газов и использованием всей системы в целом только для подогрева воздуха для горения топлива.

Одним из недостатков варки хрустальных стекол в пламенных печах является улетучивание оксидов свинца, что приводит к обеднению ими поверхностных слоев стекломассы и загрязнению окружающей атмосферы. Поэтому в стекольной промышленности все более широкое распространение для варки стекол, содержащих легколетучие компоненты, например хрусталя или специальных боросиликатных стекол, получают электрические стекловаренные печи. Конструкция электрических стекловаренных и пламенных печей существенно отличается. Варка стекла обычно производится под слоем шихты, и процесс развивается сверху вниз, в связи с чем для электрической варки применяются печи глубинного типа. Регулирование температуры легко автоматизировать, потери тепла в окружающую среду можно свести к минимуму, практически отсутствуют потери с дымовыми газами, за исключением случаев газового отопления выработочных частей при ручной выработке изделий из свинцового хрусталя. Электрические печи являются наиболее эффективными по доле полезно затраченной теплоты, их КПД варьируется в пределах 50–70%. Расход огнеупоров и материальные затраты на постройку печей значительно сокращаются, срок службы печей увеличивается. Кроме того, при использовании электрических печей создаются благоприятные условия для охраны окружающей среды. Их широкое распространение ограничивается лишь высокой стоимостью электроэнергии по сравнению со стоимостью природного газа и других видов топлива.

Продолжительность действия кампании печей для сортового стекла значительно варьируется и зависит от типа, размера и других характеристик печи. Ванные печи могут функционировать в течение 4–6 лет до холодного ремонта, для электрических печей этот период составляет до 6 лет, а для горшковых печей – от 10 до 20 лет при замене горшка каждые 3–12 месяцев.

В сравнении с печами по производству стеклотары размеры печей, используемых в производстве сортовых стекол, меньше, при этом обращение стекломассы в объеме бассейна печи больше до 1,5 раза. Эти причины обуславливают более высокое энергопотребление печей для варки сортовых стекол по сравнению с печами для тарного стекла.

Стекловарение чрезвычайно энергоемкий процесс, поэтому для повышения энергоэффективности печей в производстве сортовой посуды применяются разнообразные методы: принудительное кислородное дутье; стекловарение с комбинированным использованием ископаемых топлив и электроэнергии; стекловарение в электрических печах; периодическое плавление шихты; использование высококачественных огнеупоров и дополнительной теплоизоляции; применение систем с низким выделением NO_x ; обогащение кислородом воздуха, направляемого на горение; уменьшение отношения воздух – топливо; использование стеклобоя; применение котлов-утилизаторов избыточной теплоты отходящих газов; подогрев шихты и стеклобоя.

Горшковые печи. Горшковые печи – один из наиболее «старых» типов тепловых агрегатов, используемых для варки стекол. Примерно до середины 60-х гг. XX ст. практически все хрустальные и цветные стекла варили в горшковых печах. Горшковые печи имеют низкий тепловой КПД, они не позволяют организовать непрерывный процесс варки и выработки стекла.

Как показывает распределение энергопотребления для производства высококачественного свинцового хрусталя с применением горшковых печей, приведенное на рис. 3.7, наибольшие энергозатраты приходятся на стекловаренную печь.

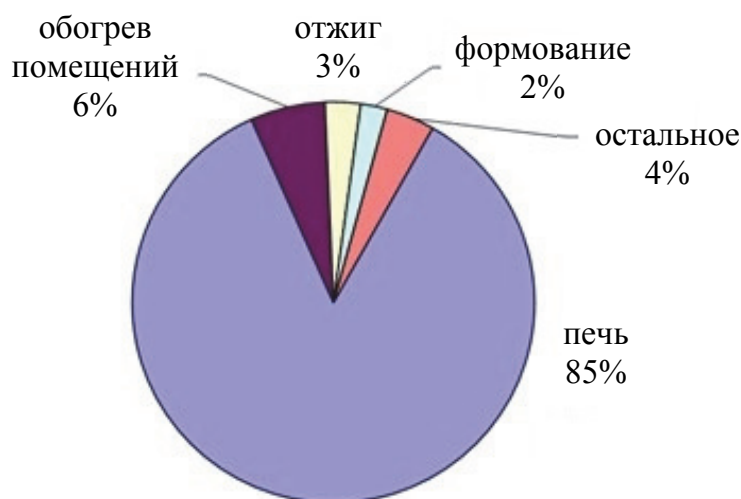


Рис. 3.7. Потребление энергии при производстве свинцового хрусталя с помощью горшковой печи

С учетом того, что при этом общее энергопотребление может достигать 60 ГДж/т готовой продукции, горшковые печи характеризуются очень высоким энергопотреблением. Это одна из

причин, по которой ваннные печи периодического и непрерывного действия, а также электропечи полностью вытеснили горшковые печи из массового производства сортовых стекол и хрусталя.

Однако для варки небольших объемов стекла специальных составов, преимущественно в производстве сортовой посуды из окрашенных стекол, горшковые печи по-прежнему распространены.

Для варки сортовых стекол могут находить применение горшковые печи как с нижним, так и с верхним подводом пламени. Компания Falorni Gianfranco Srl предлагает разнообразные модели горшковых печей с различными характеристиками для варки высококачественного хрустального и цветного стекла. Печи оборудованы системой автоматизированного управления, рекуперативными устройствами. Вмещают от 1 до 4 горшков. При правильной эксплуатации печей срок службы их составляет от 6 до 8 лет. Конструктивно печи отличаются способом отвода дымовых газов. Лучшими из предлагаемых конструкций являются печи с комбинированным движением газов. В таких печах горелки расположены так же, как и в печах с верхним подводом пламени, но отвод дымовых газов осуществляется через отверстия в поду печи. Такие печи хорошо регулируются и экономичны.

Многогоршковые регенеративные печи с нижним подводом пламени (рис. 3.8) используют в производстве сортовых изделий высокого качества из цветного и свинецсодержащего стекла. Обычно имеют до 16 горшков полезной вместимостью 300–500 кг каждый и тепловой КПД до 8%. Продолжительность цикла варки в горшковых печах составляет в основном 24 ч.

Горшковая печь состоит из рабочей камеры 4 и установленных в ней стекловаренных горшков. Основными элементами рабочей камеры являются под 5, стены и свод. Нижняя часть стен – окружка 1 – ограждает горшки. В верхней части расположены рабочие окна 2. В окружке 1 против горшков имеются отверстия (дуплешки) 7 для обслуживания. Для вставки и выемки горшков в окружке и над ней имеется отверстие 10, закрываемое специальными плитами – передками. Толщина окружки 450–500 мм. Окружку обвязывают стальными бандажами. Динасовые своды имеют обычно толщину 300 мм.

В горшковых печах с нижним подводом пламени газы подводятся и отводятся через подовые горелочные отверстия 9 – кади. Факел пламени образуется в камере частичного предварительного сгорания, на дне которой также собирается вытекающая из рабочей

камеры загрязненная стекломасса (шквара), образующаяся при проваре шихты, просыпанной при загрузке, утечке горшков и т. п.

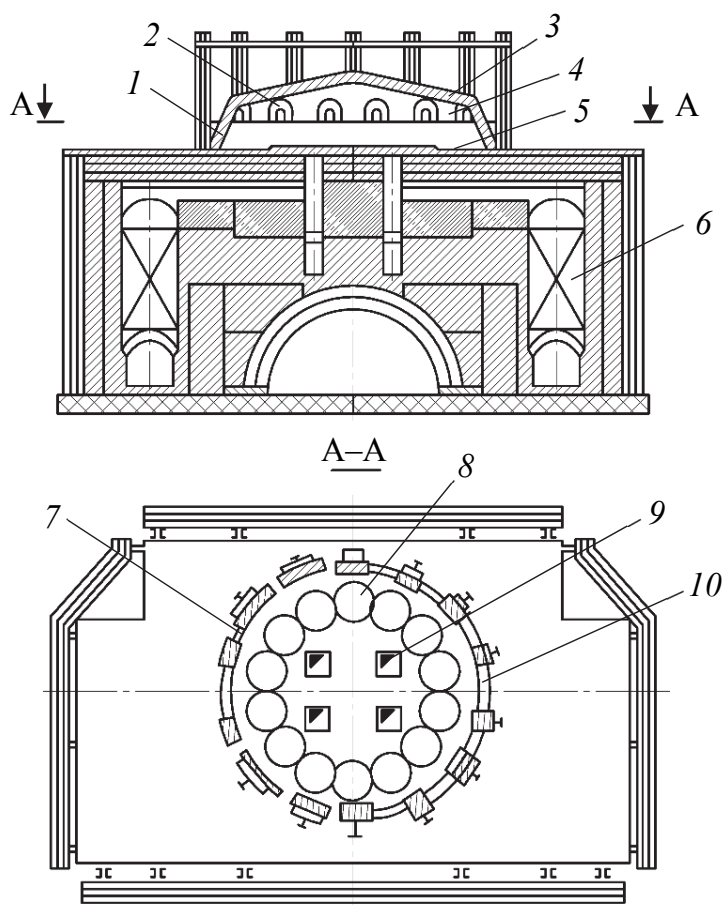


Рис. 3.8. Горшковая печь с нижним подводом пламени:

- 1 – окружка; 2 – рабочие окна; 3 – свод; 4 – стены;
5 – под; 6 – регенераторы; 7 – дуплешки; 8 – горшки;
9 – кади; 10 – отверстие с плитами

Окончательно факел развивается в пространстве между горшками. Для подогрева воздуха служат регенераторы 6. Горшки круглые, реже овальные. В вертикальном сечении они обычно имеют форму усеченного конуса, реже цилиндра. Вместимость горшков определяют исходя из производственной потребности. При работе вручную важно выработать содержание горшка в одну смену. Чем меньше размер вырабатываемых изделий, тем меньше должен быть размер горшка. Обычно применяют шамотные горшки, в некоторых случаях каолиновые и кварцевые. Шамотные горшки иногда защищают изнутри слоем кварца или глинозема.

При варке в горшке на стекломассу легко воздействовать путем перемешивания и бурления.

Специфика работы горшковых печей заключается в периодичности процесса варки и выработки изделий. Шихта в стекловаренном горшке получает тепло главным образом за счет излучения от свода печи и частично за счет теплопроводности через стенки горшка. Поэтому для горшковых печей особое значение имеет высота свода печи: чем ниже свод, тем интенсивнее прогрев горшка и находящейся в нем шихты. Шихту рекомендуется загружать только в горячие горшки, имеющие на дне «подушку» из расплавленного стекла толщиной 8–10 см.

Особое внимание следует уделять качеству изготовления горшков и их обжигу: удовлетворительным можно считать обжиг горшков при температуре 1500°C. После обжига горшки должны быть достаточно устойчивыми к действию стекла.

При варке стекла в горшковых печах все процессы (силикатообразование, стеклообразование, гомогенизация, осветление и охлаждение) чередуются во времени. Варку стекла в горшковых печах принято условно делить на четыре стадии: разогрев печи, варка стекла, осветление и охлаждение до температуры выработки. Как правило, все эти стадии осуществляются в зависимости от состава стекла и конструкции печи по определенному графику. Примерный график варки натрий-кальций-силикатного стекла для производства столовой посуды и художественных изделий приведен на рис. 3.9.

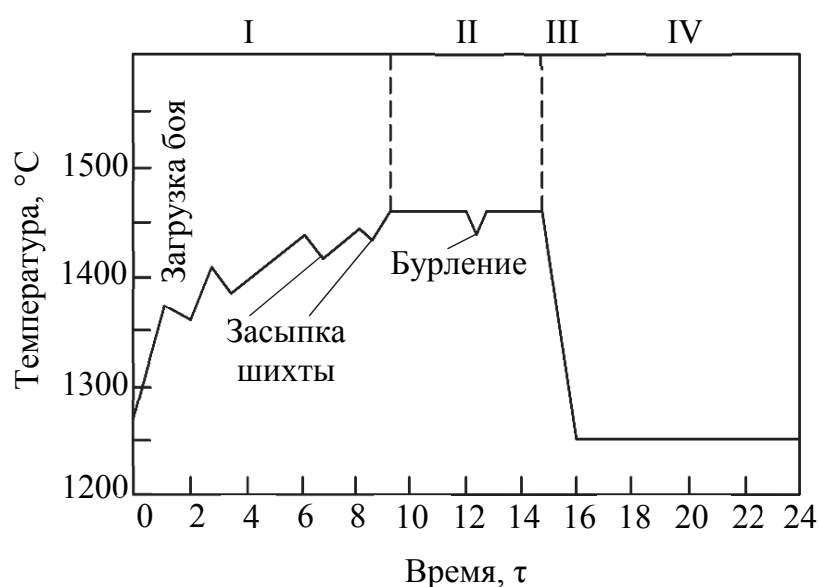


Рис. 3.9. График варки стекла в горшковой печи:

I – разогрев и варка; II – осветление;

III – охлаждение; IV – выработка

При варке стекла в горшковых печах обычно устанавливают следующий порядок. По окончании выработки измеряют остатки стекла в горшках. Эти остатки в горшках должны быть одинаковыми. Затем плотно закрывают все окна и места, через которые может засасываться холодный воздух в печь, и разогревают печь до температуры 1350–1400°C с максимальной скоростью. Сначала засыпают бой или смесь боя и шихты; после расплавления боя засыпают шихту в середину горшка, чтобы она образовывала правильный конус.

Вторично шихту засыпают, когда на пробе стекла нет непроварившихся зерен песка или когда от предыдущей засыпки остается небольшой конус нерасплавившейся шихты (диаметр конуса примерно равен 1/3 внутреннего диаметра горшка). После провара второй засыпки шихты горшок наполняют боем. После расплавления последней порции боя производится бурление стекломассы.

Бурление осуществляют следующим образом. Хорошо замоченный кусок дерева (осины) с помощью металлического стержня погружают в стекломассу. Под действием выделяющейся из дерева влаги стекломасса в горшке приходит в движение, перемешивается и приобретает однородность. Одновременно крупные пузыри, образовавшиеся из влаги, поднимаясь к поверхности стекломассы, на пути движения встречаются с мелкими газовыми пузырями, соединяются с ними, увеличиваясь в объеме, и выходят на поверхность. Бурление можно также производить сжатыми газами через трубку один или два раза. Стекло считается очищенным, если на пробе находятся редкие крупные пузыри.

После того как процесс очистки стекломассы от пузырей окончился, температура в печи снижается, стекломасса охлаждается и приобретает необходимую для выработки изделий вязкость. Далее проводится подготовка печи, горшков, рабочих мест мастеров-выдувальщиков и начинается выработка изделий.

Часто встречающаяся необходимость варки свинцового хрусталя в одной печи с кальциевыми стеклами требует согласования режимов их варки. Это вполне возможно осуществить в горшковых печах. Конечно, необходимы те или иные поправки, связанные с конкретными условиями (особенность конструкции печи, состав стекол, количество боя и пр.). Поскольку свинцовые стекла более легкоплавки, иногда оказывается полезным начинать их засыпку на 30–60 мин позже, чем других стекол. Время бурления следует выбирать с таким расчетом, чтобы все стекла варились

одновременно. Ввод боя (того же состава) и здесь допустим только до 30–40%. Однако значительно лучшие результаты получаются при варке хрустали с меньшим вводом боя или даже совсем без него. Это естественно, так как при переплавке боя он вторично насыщается соединениями железа из горшка.

Засыпка шихты ведется «на конус». Рекомендуется трехкратное бурление с интервалами в полчаса, так как свинцовый хрусталь варится и очищается быстрее других стекол. Бурление свинцовых стекол обычно производится картофелем, репой, свеклой. В некоторых случаях бурление деревом может восстановить PbO до металлического свинца. При регулярном бурлении свинцовых стекол деревом на дне тиглей образуются слитки свинца. Картофель и корнеплоды, содержащие много воды, не успевают заметно оказать восстанавливающее действие. Рекомендуется поддерживать окислительный характер пламени. Восстановительные условия варки недопустимы, так как оксид свинца может либо восстановиться, либо перейти в сульфид, что вызовет нежелательную серую или коричневую окраску стекла. Создание окислительных потенциалов стекломассы и атмосферы печи позволит избежать восстановления оксидов свинца и железа. Окислительный потенциал стекломассы определяется содержанием селитры, мышьяка и сурика в шихте. Совместное введение этих компонентов в шихту обеспечивает наличие кислорода в течение всего процесса варки стекла. Окислительный потенциал атмосферы печи создается при полном сгорании топлива. В продуктах сгорания не должно быть CO при коэффициенте избытка воздуха 1,25–1,30, что предотвращает возникновение даже локальных восстановительных условий.

Варка в ваннных печах. Процесс варки стекла в периодических ваннных печах аналогичен процессу варки его в горшковых печах. Однако более эффективное использование варочной части делает периодические ваннные печи экономичнее горшковых.

Ваннные печи непрерывного действия – более совершенные тепловые агрегаты, чем горшковые и ваннные периодического действия, поэтому они и получили наибольшее распространение в промышленности. Одним из существенных преимуществ варки стекла в ваннных печах является одновременное и непрерывное осуществление всех стадий стекловарения. Это позволяет в максимальной степени механизировать весь процесс, начиная от засыпки шихты и кончая выработкой стеклоизделий.

В производстве сортовой посуды преимущественно применяют ванны непрерывного действия с подковообразным направлением пламени с протоком (рис. 3.10).

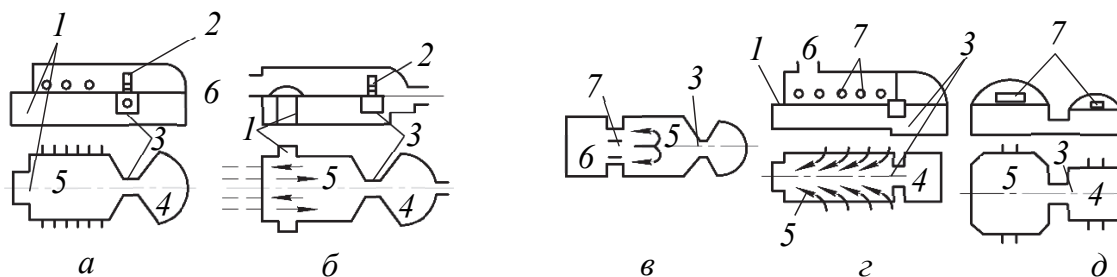


Рис. 3.10. Схемы проточных регенеративных ванн с поперечным (а) и подковообразным (б) направлением пламени; рекуперативной с подковообразным направлением пламени (в), прямого нагрева (г) и с самостоятельными варочными и выработочными бассейнами (д);
1 – загрузочный карман; 2 – решетчатый экран; 3 – проток;
4 – выработочная часть печи; 5 – варочная часть печи; 6 – рекуператор, или дымовая труба; 7 – горелки

Протоки позволяют отбирать более охлажденную и лучше проваренную стекломассу, повысить производительность печи. Для устранения возвратного потока и лучшего охлаждения стекломассы протоки заглубляют и устраивают пороги.

Для облегчения обслуживания протока и ликвидации застойных зон стены бассейна в области протока скашивают на $15\text{--}20^\circ$, а для уменьшения разъедания огнеупора проток охлаждают воздухом с помощью вентилятора или водой, подаваемой в холодильники.

Газовое пространство печей разделяют решетчатыми перегородками (экранами). Выработочная часть печи в этом случае не имеет самостоятельного отопления. Тепло для ее обогрева передается из варочной части излучением и потоками стекломассы. Особенности конструкции печей для варки хрусталя являются глухие экраны по пламенному пространству и индивидуальный обогрев варочной и выработочной частей, что позволяет более точно регулировать температурный режим варки и выработки.

Температура газовой среды в варочной части печи бесцветных натрий-кальций-силикатных стекол в зоне квель-пункта устанавливается в пределах $1420\text{--}1460^\circ\text{C}$, температура в выработочной части – $1230\text{--}1250^\circ\text{C}$. Для свинцового хрусталя с $30\text{--}35 \text{ мас. } \% \text{ PbO}$ целесообразны и достаточно пониженные температуры варки $1200\text{--}1300^\circ\text{C}$, подобно тому, как это делается в отношении флинт.

Однако свинцовый хрусталь можно варить и при температурах 1400–1450°C. Рекомендуют повышенную температуру варки хрусталя, считая, что это способствует устранению свильности и камней, особенно при многократном бурлении. Однако необходимо иметь в виду, что, помимо устранения пороков по неоднородности, следует помнить и о прозрачности стекла, которая находится в зависимости от растворения огнеупоров стеклом. Существенной особенностью свинцовых стекол является их повышенная способность разъедать материал огнеупора. Это вызвано тем, что все компоненты шихты таких стекол, включая и сурик, легкоплавки; единственным тугоплавким компонентом является кварцевый песок, который вводится в количествах, значительно-меньших, чем для других стекол (около 55–60%).

С этой точки зрения низкие температуры варки более выгодны, так как обеспечивают пониженное насыщение стекла оксидом железа и оксидом титана из огнеупоров. Одновременно они снижают и количество переходящего оксида железа в форму Fe_2O_3 .

Следует отметить, что высокие температуры варки свинцовых хрусталей также увеличивают улетучивание соединений свинца. Снижение улетучивания возможно путем повышения удельных съемов стекломассы, варки при возможно низких температурах, создания оптимальных гидродинамических режимов, ввод гранулированной шихты.

Конструкции ванн стекловаренных печей для варки сортовых стекол весьма разнообразны и непрерывно совершенствуются ведущими мировыми производителями в производстве тепловых агрегатов для стеклоделия (табл. 3.8).

Таблица 3.8

Характеристика ванн стекловаренных печей непрерывного действия

Наименование фирмы произ- води- теля	Тип печи	Особенности конструкции	Произво- дитель- ность, т/сут	Удель- ный съем стекло- массы, кг/м ² ·сут	Расход топлива, м ³ /ч	Потреб- ление энергии, кДж/кг
1	2	3	4	5	6	7
Bedogni	Unit-Melter	Ванная печь не- прерывного дей- ствия с одним рекуператором длиной 4 м	13,0	1150	280	17 000

Продолжение табл. 3.8

1	2	3	4	5	6	7
SORG	Flex-Melter	Печь с комбинированным обогревом (45% электроэнергии)	10,5	—	—	7 750
Falorni	Рекуперативная, ванная, проточная с раздельным отоплением варки и выработки с зоной кондиционирования	В зависимости от производительности печь комплектуется одним или двумя рекуператорами, расположенными с торцевой стороны печи. Температура подогрева воздуха от 350 до 550°C. Вместимость бассейна печи от 5 до 45 т. Глубина бассейна от 600 до 1 100 мм	9	900	Варочный бассейн — 125–130; на один выработочный бассейн — 10	10 900
			3	750	58,75	15 750
			5	1 000	80	13 400
			8	1 250	116	11 750
			20	1 420	250	10 050
			30	1 500	350	9 350
IWG	Рекуперативная, ванная, проточная с раздельным отоплением варки и выработки	Подогрев воздуха в двух рекуператорах в отдельных потоках с выходом дымовых газов вниз	9	900	Варочный бассейн — 170–180; на один выработочный бассейн — 15–20	14 000–16 000
	Регенеративная, проточная, с раздельным отоплением варки и выработки	Подковообразное направление пламени. Отдельная выработочная зона с автономным обогревом, с одним фидерным каналом	12–14	1 000	Варочный бассейн 190	10 800
Стеклозавод «Неман»	Регенеративная, проточная, с раздельным отоплением варки и выработки	Подковообразное направление пламени, нижний подвод топлива	7,7–8,5	595–685	170–290	20 800–25 890

Окончание табл. 3.8

1	2	3	4	5	6	7
Стеклозавод «Неман»	Регенеративная, проточная, с раздельным отоплением варки и выработки	Подковообразное направление пламени, боковой подвод топлива	6,4	350	243	30 500
		Полуподковообразное направление пламени, боковой подвод топлива	6,0–6,8	337–350	260–270	31 350–34 190

Печи Unit-Melter (рис. 3.11, а) производительностью до 30 т/сут предназначены для варки высококачественного натрий-кальций-силикатного стекла, хрустального стекла, вырабатываемого на автоматизированных линиях.

Основными особенностями этого типа печей являются горелки, расположенные вдоль боковых стен варочной части печи. Дымоход и металлический рекуператор радиационного типа для предварительного нагрева воздуха находятся с торцевой стороны печи. Как и все печи прямого нагрева, она имеет малую ширину.

Тепло отходящих газов используется в металлическом рекуператоре для подогрева воздуха, идущего на горение высококалорийного газа, сжигаемого с очень малым избытком воздуха с помощью беспламенных горелок.

Оптимальная конструкция печи позволяет осуществлять варку при низком удельном расходе тепла на стекловарение. Каждая печь проектируется в соответствии с конкретными пожеланиями и требованиями заказчиков.

Печи End-Fired (рис. 3.11, б) производительностью до 10 т/сут предназначены для организации производства сортового штучного стекла ручным или полуавтоматическим способом. В этом типе печей горелки и канал для отбора дымовых газов находятся с торцевой стороны печи. Эти печи также комплектуются металлическими радиационными рекуператорами для предварительного нагрева воздуха, подаваемого на горение.

Печи Оxy-fired (рис. 3.11, в) – это печи прямого нагрева, в которых для сжигания топлива используют кислород. Они разработаны главным образом для производства специальных типов стекол.

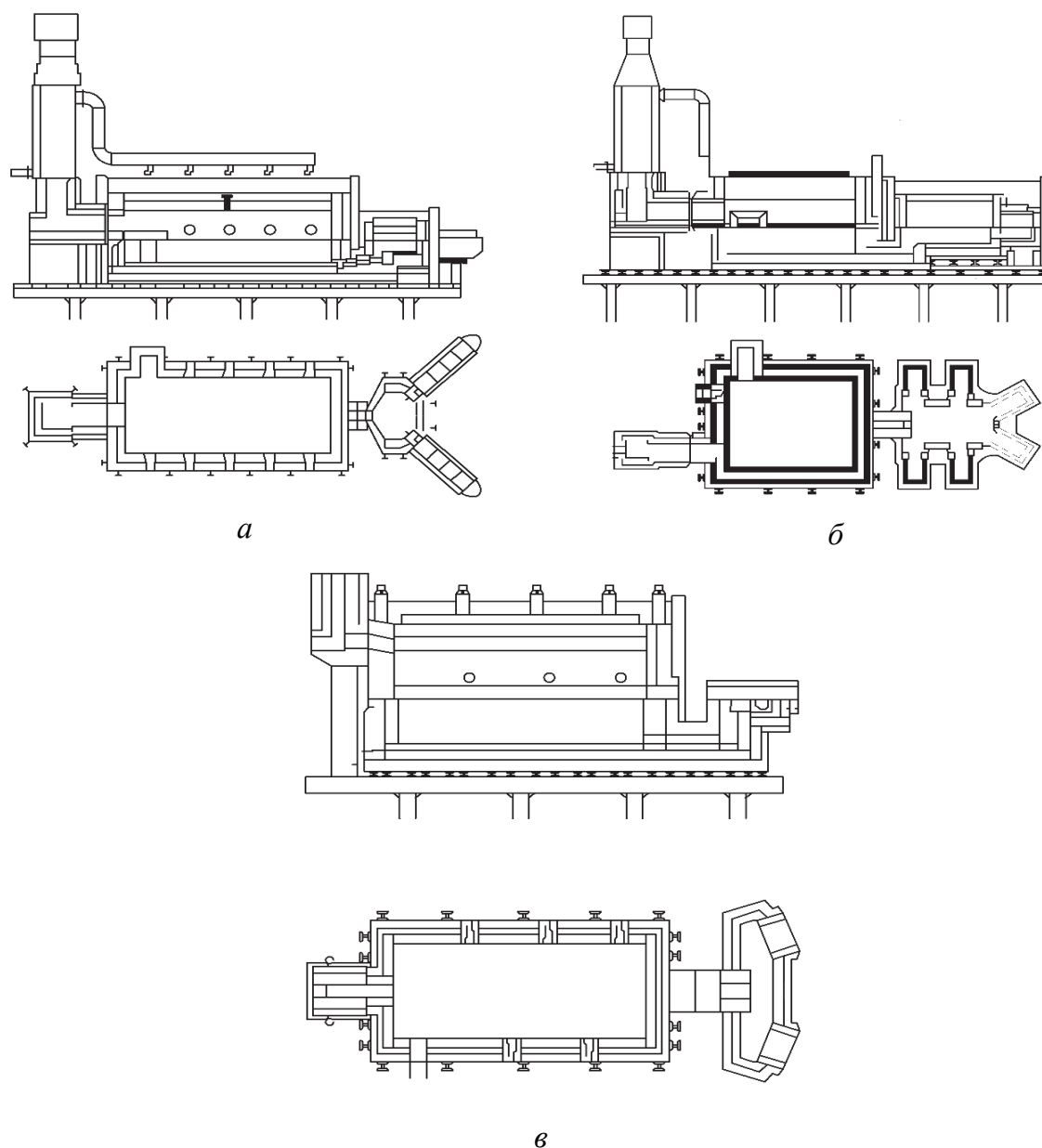


Рис. 3.11. Ванные стекловаренные печи непрерывного действия:
а – Unit-Melter; *б* – End-Fired; *в* – Oxy-fired

Ванные стекловаренные печи периодического действия MT Forni Industriali (day-tank) (рис. 3.12), предназначенные для ручного или полуавтоматического производства штучных изделий, выполнены в металлическом кожухе.

Бассейн печей по форме может быть прямоугольный или круглый. Ванные печи с круглым бассейном позволяют достигать более высокой химической и термической однородности стекла. Отопление печи осуществляется с помощью тангенциально расположенной горелки. Такое расположение горелки образует по периметру камеры печи замкнутое кольцо продуктов горения, которое равномерно

прогревает стекломассу. Печи оборудуются системой слива стекломассы, что позволяет оперативно менять ассортимент выпускаемого стекла. Для утилизации тепла отходящих газов используются рекуператоры.

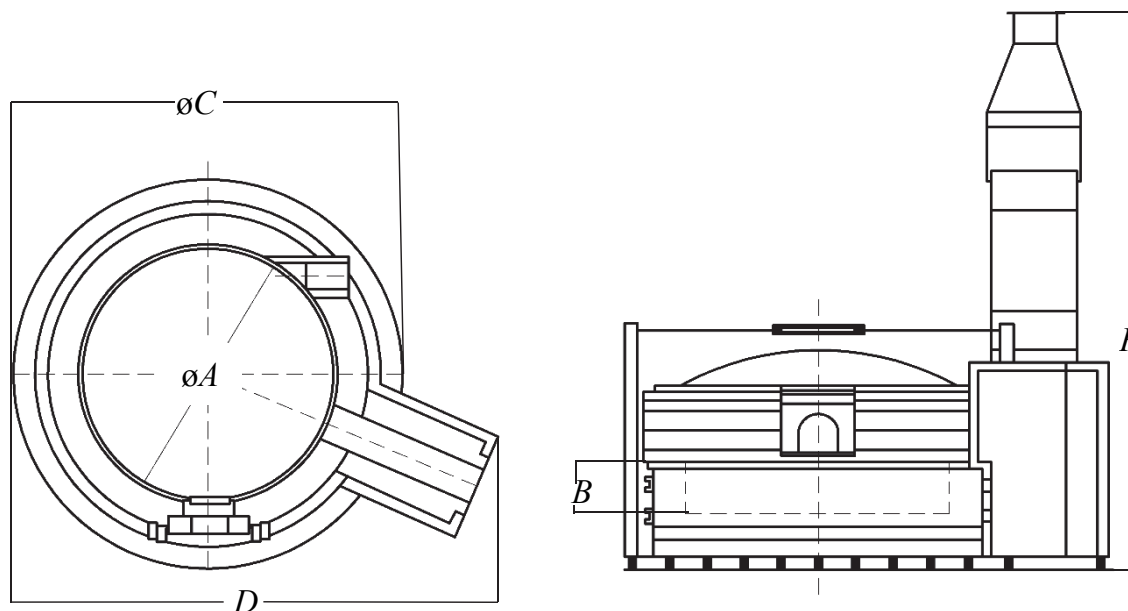


Рис. 3.12. Ванная стекловаренная печь периодического действия

Выпускаемые компанией Falorni ваннные стекловаренные печи непрерывного и периодического действия по совокупности конструктивных признаков и технико-экономических характеристик близки к описанным выше печам фирмы MT Forni (Day Tanks, Unit-Melter).

Применение электрической энергии для варки стекла. Использование электроэнергии для варки стекла основано на свойстве стекломассы проводить электрический ток при температурах выше $1000\text{--}1100^\circ\text{C}$, выделяя теплоту по закону Джоуля – Ленца.

Электротермия в промышленном стекловарении известна в двух вариантах: в виде дополнительного подогрева в ваннных печах с пламенным отоплением и в виде чисто электрических печей. Если первый тип печей отапливают газом, то их называют газозлектрическими или печами с комбинированным нагревом.

Широкое их развитие объясняется двумя причинами. С одной стороны, преимущество использования электроэнергии в качестве источника тепла объясняется тем, что тепло выделяется в самом расплаве, что приводит к значительному повышению теплового КПД стекловаренного агрегата. С другой стороны, это вызвано

изменением энергетической структуры в топливном балансе в сторону удорожания органического топлива и его дефицитностью, а также постоянным ужесточением экологических требований к промышленным установкам.

Дополнительный электроподогрев (ДЭП). Общая схема технологического процесса варки стекла при использовании электротермии как дополнительного источника тепла остается аналогичной пламенным, т. е. печи имеют варочные бассейны, из которых стекломасса поступает в выработочную часть печи.

Технико-экономический смысл комбинированного отопления заключается в том, что КПД использования электроэнергии приближается к 90%, в то время как КПД факела оказывается равным не более 50%, т. е. дополнительный электроподогрев в 2–3 раза эффективнее пламенного обогрева. Поэтому его применение будет оправданным, несмотря на более высокую стоимость электроэнергии по сравнению с природными видами топлива. В мировой практике экономически эффективное соотношение стоимостей 1 кДж тепла от ископаемых видов топлива и от электроэнергии находится в пределах от 1 : 3 до 1 : 9. При этом стоимость установки дополнительного электроподогрева составляет только небольшой процент стоимости строительства ванной печи и технологического оборудования. Основной целью использования дополнительного электроподогрева является увеличение производительности печи при сохранении ее габаритов и улучшение качества стекломассы как по однородности, так и по степени осветления. Введение электроподогрева без изменения традиционной схемы конвекции стекломассы в стекловаренной печи повышает ее производительность на 10–60%. Дополнительный электроподогрев позволяет доводить удельные съемы стекломассы с площади варочного бассейна в среднем до 3000–4000 кг/ (м²·сут).

Теоретически для варки 1 кг стекла из шихты с 30% боя при содержании Na₂O 15 мас. % требуется около 0,600 кВт·ч. Фактический расход электроэнергии зависит от тепловой изоляции бассейна ванной печи, поэтому при расчетах систем электроподогрева принимают величину расхода электроэнергии на 1 кг дополнительно сваренной стекломассы, равной 0,7–0,8 кВт·ч.

Степень повышения производительности печи с помощью дополнительного электроподогрева зависит от количества поданной электроэнергии. Возможны подача до 50% электротермии в общем расходе тепловой энергии на отопление печи и повышение

производительности печи на 60–100%. В среднем современная печь традиционной конструкции может быть электрифицирована на 15%, а усовершенствование ее конструкции позволит повысить долю ДЭП до 30–40%.

Имеется формула для расчета мощности дополнительного электроподогрева $P_{эл}$, ккал·ч, в зависимости от достигнутой производительности печи и желаемого прироста:

$$P_{эл} = y \cdot B = (183 \pm 152) \cdot B + 79 \cdot A, \quad (3.1)$$

где y – удельный расход тепла на 1 кг прироста производительности, ккал/кг; B – прирост производительности, т/ч; A – производительность печи, кг/ч.

Дополнительный электроподогрев имеет целый ряд преимуществ по сравнению с пламенной варкой: уменьшается температура в подсводовом пространстве, что увеличивает производительность печи, появляется возможность лучшей стабилизации теплового режима в ванной печи, а также большей маневренности производительностью печи. Особенно эффективен дополнительный электроподогрев стекломассы для варки цветных стекол, обладающих низкой теплопроводностью.

Наиболее эффективным является применение на современных печах с дополнительным электроподогревом донных вертикальных электродов. Вертикальное расположение электродов способствует быстрому и беспрепятственному подъему вверх стекломассы, которая особенно интенсивно нагревается вблизи электродов и становится легче. Вынос на поверхность относительно холодных придонных слоев стекломассы приводит к хорошему ее осветлению и гомогенизации.

Высоту вертикальных электродов выбирают таким образом, чтобы расстояние от конца электрода до поверхности зеркала составляло 1/10 глубины стекломассы в бассейне.

Электроподогрев может быть осуществлен вблизи загрузочного кармана, в варочной зоне и в зоне осветления (рис. 3.13, 3.14).

Оптимальным местом установки электродов является зона максимальных температур. Электроды устанавливают поперек печи в один или несколько рядов на расстояниях, равных глубине бассейна или несколько ближе, так, чтобы в этой зоне печи выделялась большая часть подаваемой электроэнергии. В результате возникает интенсивный поток стекломассы к зоне загрузки шихты. Это задерживает плохо проваренную стекломассу в зоне варки на более

длительное время. При очень высокой производительности загружаемая холодная шихта слишком сильно охлаждает слои расплава, находящегося под шихтой.

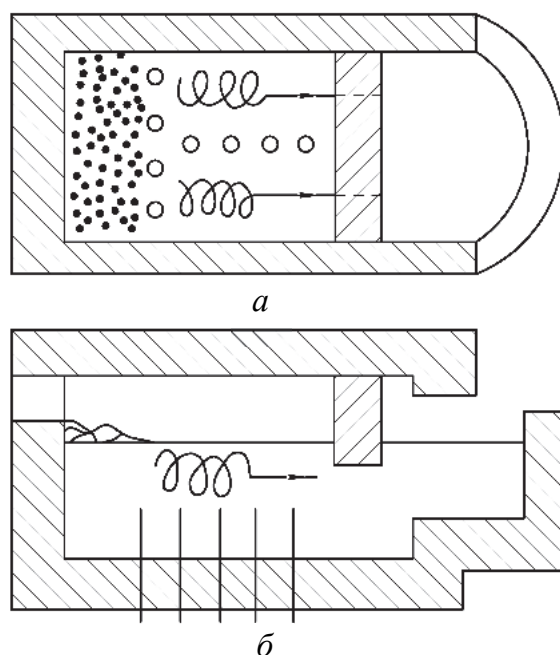


Рис. 3.13. Потoki при сочетании продольного и поперечного рядов электродов:
а – план; б – поперечный разрез

Для ликвидации этого явления электроды необходимо размещать в зоне варки под шихтой для того, чтобы здесь поддерживать высокую температуру стекломассы. Доля электроподогрева в зоне варки под шихтой может составлять до 30% от той мощности ДЭП, которая подается в зону максимальных температур.

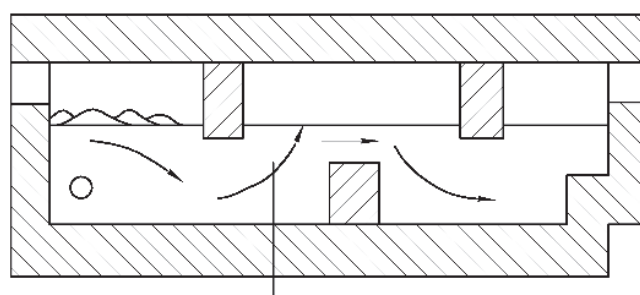


Рис. 3.14. Конвекционные потоки при последовательном расположении преград одного типа

Электроды размещаются группами по 6 шт. с независимым питанием каждой группы по трехфазной схеме, в зоне максимальных температур устанавливают 3–4 группы.

Повышению производительности печей и улучшению качества стекла способствует создание сложного движения стекломассы в зоне варки и осветления, т. е. искусственного удлинения пути следования свежесваренной стекломассы, так как на конвекционные потоки, образовавшиеся под действием газопламенного обогрева, накладываются местные конвекционные потоки от электродов. Причиной возникновения этих потоков является неравномерность прогрева стекломассы вблизи электродов. Примерно 90% энергии выделяется в радиусе, равном десяти диаметрам электрода (рис. 3.15). Поэтому слои стекломассы, непосредственно прилегающие к электроду, подвергаются более сильному нагреву, так как максимальная плотность мощности возникает в этих слоях.

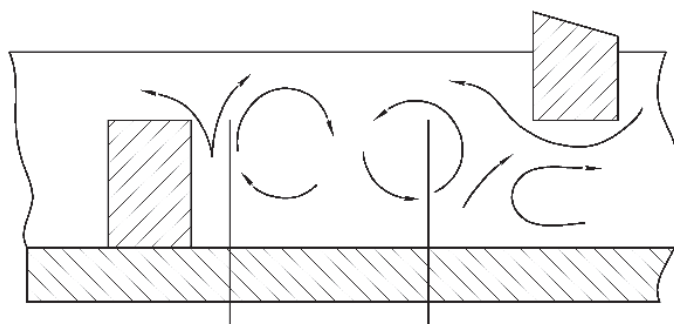


Рис. 3.15. Сочетание порога и двух рядов донных электродов за порогом

Интенсивность разрушения электродов зависит от состава шихты и стекла, материала и местоположения электродов, а также от температуры варки. Исходя из условий службы электродов, к их материалу предъявляются следующие требования: максимальная стеклоустойчивость, жаропрочность и жаростойкость, минимальное воздействие продуктов разрушения электродов на качество стекла, и в частности на его окраску, высокая электропроводность и возможность изготовления электродов требуемой формы.

Материалами электродов являются молибден, графит, диоксид олова, диоксид циркония и другие. Наибольшее распространение получили молибден и диоксид олова, причем для получения стекол в окислительной среде (например, свинцового хрусталя) применяется главным образом диоксид олова. В качестве материала для электродов системы дополнительного электроподогрева используется молибден. Металлический молибден имеет температуру плавления 2620°C , максимальную рабочую температуру 2000°C , удельное электрическое сопротивление $0,048\text{--}0,056\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$,

объемную массу $10\,000\text{ кг/м}^3$. Молибденовые электроды обладают высокой стеклоустойчивостью, а продукты разрушения слабо окрашивают стекломассу. Однако на воздухе при температуре выше 500°C молибден окисляется. Поэтому части электрода, проходящие через кладку и выступающие наружу, охлаждаются водяными холодильниками. Для стержневых молибденовых электродов используются электрододержатели.

Металлические электроды изготавливаются в виде стержней диаметром 30–50 мм или пластин толщиной 3–5 мм. Стержневые электроды устанавливаются в специальных водоохлаждаемых держателях, позволяющих продвигать стержни по мере их износа внутрь печи. Наибольшая допустимая плотность тока на поверхности молибденовых электродов составляет 3 А/см^2 .

Часто электродами служат блоки из SnO_2 размером $0,2\times 0,2\times 0,1\text{ м}$ или стержни диаметром 50–80 мм. Керамические электроды устанавливают без холодильников, однако для предотвращения вытекания стекломассы через зазор между электродами и кладкой по периметру электрода с наружной стороны ставят трубчатый холодильник. Допустимая плотность тока на поверхности керамического электрода составляет $0,5\text{ А/см}^2$. Ответственной деталью керамического электрода является металлический токопровод от питающего шинопровода.

Иногда применяют схему электроподогрева, в которой наряду с двумя рядами электродов в квельпункте предусмотрены боковые горизонтальные электроды в зоне варки. С целью воздействия на организацию потоков в стекловаренной печи известны конструкции печей, в которых сочетались дополнительный электроподогрев с порогом или барботажем. В проточных печах с высоким съемом порог способствует созданию эффективного термического барьера (рис. 3.15). Освещение потока придонной стекломассы в печи с порогом улучшается.

Питание электродов осуществляется отдельными трехфазными трансформаторами в комплекте с вольтдобавочным трансформатором для плавного регулирования.

Изложенные сведения о дополнительном электроподогреве следует дополнить информацией о тех печах, которые стали распространяться в Западной Европе фирмой «Зорг» в последние пять лет. Их называют печами с глубинным освещением (рис. 3.16). В отличие от печей с тонким слоем они имеют в 2 раза большую глубину варочного бассейна в зоне освещения по сравнению с его

глубиной в зоне плавления шихты. При этом вся зона варки занята вертикальными электродами, чтобы организовать равномерное нисходящее движение выработочного потока стекломассы в проток. Такое расположение электродов позволяет сочетать преимущества как горизонтальной, так и вертикальной варки.

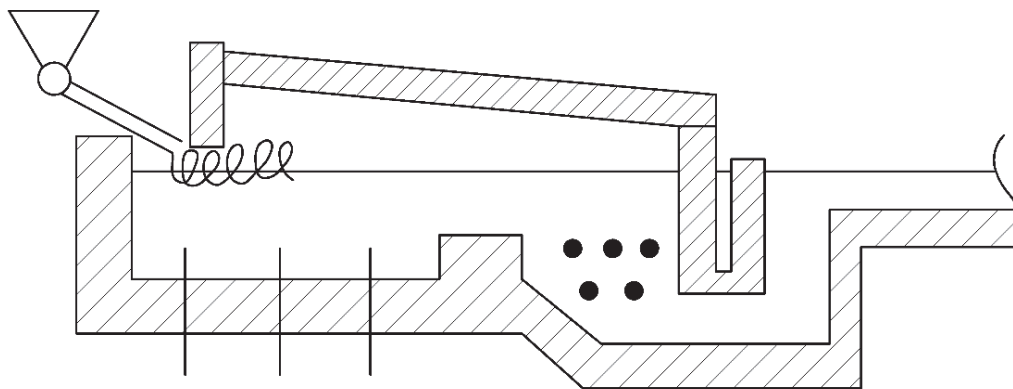


Рис. 3.16. Газозлектрическая печь фирмы «Зорг»

Печи фирмы «Зорг» – типичный пример печи, в которой естественная конвекция полностью подавлена, а вместо нее за счет изменений конструкции бассейна и размещения электродов обеспечено принудительное рациональное движение стекломассы. В них используется 50% электроэнергии от общего расхода топлива на печь.

Применение дополнительного подогрева позволяет эксплуатировать эту печь при низких температурах пламенного пространства, что снижает объемы вредных выбросов и увеличивает длительность функционирования данных печей.

Электрические печи. Из всех известных прогрессивных способов варки в наибольшей степени требованиям оптимизации всех стадий процесса стекловарения удовлетворяет электрическая печь.

Экономическая целесообразность использования электрических печей зависит в основном от разницы цен на электроэнергию и ископаемые топлива. Электрические печи чрезвычайно теплоэффективны, обычно они требуют в 2–4 раза меньше энергии, чем традиционные топливные печи, и чем меньше печи, тем больше это различие. Кроме того, обычно электрические печи обеспечивают больший удельный съем стекломассы с площади варочного бассейна.

Некоторые характеристики электрических печей, используемых в производстве сортовых стекол, приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Характеристики электропечей для производства сортового стекла

Тип печи	Производительность, т/сут	Стеклобой, %	Удельное потребление энергии на варку, ГДж/т	Комментарии
Электрическая	28	н/д	4,1	Рукавный фильтр
	65	н/д	3,42	Опаловое стекло. Печь с холодным сводом, рукавный фильтр, оптимизированный состав шихты
	32	35	3,8	Бессвинцовое хрустальное стекло
	48	40	3,7	Высококачественное натрий-кальций-силикатное стекло

Электрические печи требуют значительно меньших капитальных затрат на установку и ремонт по сравнению с традиционными печами, что частично компенсирует высокие текущие расходы. Однако такие печи выдерживают меньшую продолжительность кампании до ремонта или полного восстановления; продолжительность функционирования составляет от 2 до 6 лет по сравнению с 10–12 годами для традиционных печей. Для малых (10–50 т стекломассы в сутки) печей из-за относительно высоких потерь теплоты в топливных печах электрические печи могут быть более конкурентоспособны.

Существует верхний предел целесообразности использования электрических печей, тесно связанный с более высокой стоимостью электроэнергии:

- использование электрических печей мощностью меньше 75 т обычно может быть оправдано;
- использование электрических печей мощностью в диапазоне от 75 до 150 т стекломассы в сутки может быть оправдано в определенных условиях;
- использование электрических печей мощностью более 150 т стекломассы в сутки обычно не может быть оправдано.

Электрические печи широко используют для производства стекла в тех случаях, когда это потенциально связано с высокой летучестью и токсичностью (например, при производстве хрусталя или опалового стекла), и для производства продукции с высокой

добавленной стоимостью. Обычно электрические печи обеспечивают выпуск однородного стекла высокого качества, что может быть определяющим для использования метода при производстве сортовой посуды.

Низкие потери сырьевых материалов, характерные для использования этого метода, облегчают утилизацию уловленной средозащитным оборудованием шихты, а также снижают потери материалов, в особенности значимые для токсичных и (или) дорогих материалов, в частности оксидов свинца, фторидов, соединений мышьяка, тетрабората натрия и т. п. Это сопровождается не только экономией дефицитных материалов, но и уменьшает загрязнение окружающей среды в 5–8 раз по сравнению с пламенными печами.

Полная замена процесса сжигания ископаемых топлив устраняет выделение продуктов горения, в частности NO_x , диоксида углерода, диоксида серы. Однако если учитывать эффективность процессов производства и передачи электроэнергии и связанное с ними выделение загрязняющих веществ, использование электроэнергии для стекловарения является менее эффективным с точки зрения минимизации воздействия на окружающую среду, и в частности выделения парниковых газов.

Прямое введение энергии в стекломассу позволяет добиться более высокой ее концентрации в расплаве, чем в случае пламенной варки. Следствием является повышение температуры расплава и усиление массообмена в стекловаренной печи, что способствует значительному ускорению процесса варки.

Об эффективности электрических печей могут свидетельствовать следующие сравнительные данные. Если максимальные удельные съемы стекломассы с площади варочного бассейна при пламенном отоплении составляют 1500–2800 кг/(м²·сут), в пламенно-электрических печах – до 4500 кг/(м²·сут), то в электрических печах – от 6000 кг/(м²·сут) до 10 т/(м²·сут).

Малые размеры электрических печей и отсутствие регенераторов значительно сокращают производственные площади и приводят к экономии огнеупорных материалов. Особенно значительны эти преимущества на крупных электрических печах. За счет уменьшения теплопотерь в электрических печах достигается большая экономия топливно-энергетических ресурсов.

Электроварка свинцового хрусталя позволяет использовать огнеупоры высокого качества, обеспечивающие намного лучшее качество стекла и поэтому меньшую долю брака стекла. Поскольку

электрическая варка осуществляется в непрерывном режиме, обычно ее применение связано с применением автоматического формования. Эти факторы могут обеспечить энергопотребление в рамках 25 ГДж/т продукции.

Нагрев электрическим током позволяет также покрыть всю поверхность варочного бассейна шихтой и вести процесс варки стекла под слоем шихты. Благодаря этому варочная часть оказывается закрытой со всех сторон, в результате чего резко снижаются ее теплотери. Тепловой коэффициент полезного действия варочной зоны электрической печи достигает 60–70%.

В табл. 3.10 приведены преимущества электрических и газозлектрических печей для варки стекла в сравнении с пламенными.

Таблица 3.10

Преимущества электрических и газозлектрических печей

Электрические печи	Газозлектрические печи
1. Компактность печной установки и упрощение ее конструкции благодаря отсутствию складов угля, насосных установок для жидкого топлива, газогенераторов, дымоходов, дымовых труб и т. д. Заменяющие их трансформаторы имеют очень большой срок амортизации	1. Повышение скорости провара шихтных материалов и увеличение съема стекломассы
2. Обеспечение условий труда у печи, отсутствие копоти, дыма, грязи, что позволяет располагать стекольные заводы на любом участке промышленных районов	2. Улучшение качества стекла и условий службы огнеупоров
3. Установка электрических печей занимает меньше места и не требует возведения специальных зданий, в связи с чем нужно значительно меньше первоначальных капиталовложений. Количество огнеупоров в 4 раза меньше, чем для пламенных стекловаренных печей	3. Гибкость в управлении режимом печи
4. Возможность полной автоматизации, большая точность регулирования температуры в различных зонах печи, постоянство режима	4. Более низкие температуры в пламенном пространстве печи и увеличение срока службы огнеупоров
5. Почти полное отсутствие потерь от улетучивания компонентов стекломассы или уноса частиц шихты с пламенными газами, более высокое качество стекла	5. Уменьшение летучести компонентов шихты и засорения насадок регенераторов
6. Расход обесцвечивателей, например селена, в 8 раз меньше для одного и того же стекла, чем в пламенной печи	6. Облегчение загрузки шихты

Окончание табл. 3.10

Электрические печи	Газоэлектрические печи
7. Коэффициент полезного действия достигает 75% (по сравнению с 19–23% для пламенных печей)	7. Улучшение регулирования конвекционных потоков
8. Большая однородность стекла по сравнению со стеклом, сваренным в пламенных ваннах печей	8. Облегчение удаления мелкой мошки и улучшение однородности стекла

Известны три варианта подвода электроэнергии к стекломассе в электрических печах с помощью:

- пластинчатых электродов с горизонтальным креплением – схема Джелла;
- стержневых горизонтальных электродов – схема Бореля;
- донных стержневых электродов (схема Пенберти).

Недостатком пластинчатых электродов является зависимость срока службы электродов и печи от их износа, в то время как замена их возможна только во время холодного ремонта.

Недостатки пластинчатых электродов послужили причиной того, что эти электроды нашли не очень широкое применение в стекловарении. Главным преимуществом стержневых электродов по сравнению с пластинчатыми является возможность продвижения их в печь по мере разрушения.

Горизонтальные электроды устанавливают в отверстия в боковых стенах бассейна в печах площадью 15–60 м² на глубине 200–600 мм от поверхности стекломассы. При наличии трехфазного тока электроды, как правило, размещают тремя парами друг против друга (рис. 3.17, 3.18).

В практике стекловарения применяются электрические печи глубинного типа. Процесс варки стекла в этих печах протекает в вертикальном направлении, т. е. от поверхности стекломассы, полностью покрытой слоем шихты, выработочный поток направляется вертикально вниз. В этих условиях последовательные стадии варки стекла протекают на различной глубине печи. Проследить эти стадии с помощью проб стекломассы, как это делают в традиционных стекловаренных печах, в данном случае трудно.

Расплавление шихты происходит снизу, так как над поверхностью шихты поддерживается температура не выше 300°C. Выделение тепла непосредственно в стекломассу приводит к тому,

что в стекломассе устанавливается поле температур с максимумом в средней части печи по ее высоте. Причем эти температуры достигают высоких значений (до 1600°C), тогда как температура стекломассы в пламенной печи редко превышает $1450\text{--}1480^{\circ}\text{C}$.

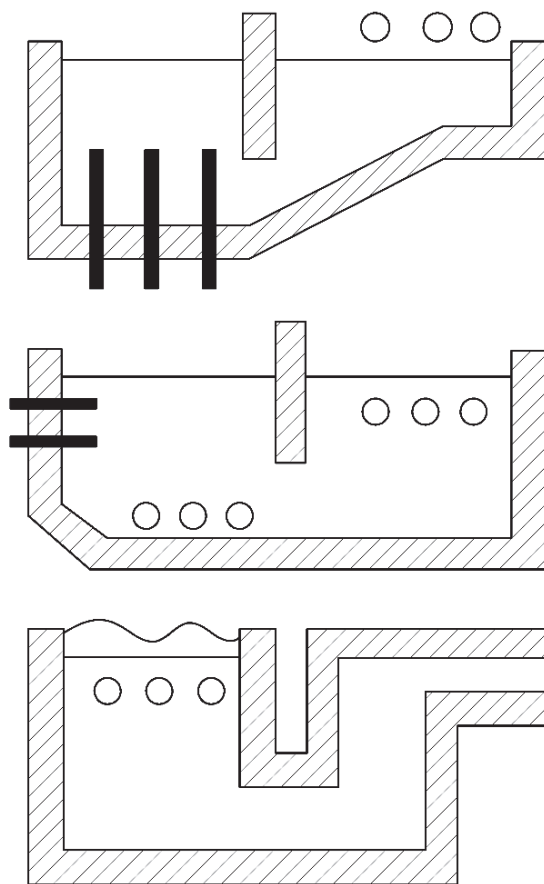


Рис. 3.17. Различные варианты электрической печи для производства сортового стекла

Вблизи электродов и непосредственно под слоем шихты возникают интенсивные локальные потоки стекломассы, которые ускоряют процессы силикато-, стеклообразования и гомогенизации. Ниже зоны максимальных температур выработочный поток представляет собой равномерное опускание готовой стекломассы к глубинному потоку. Скорость этого движения должна быть минимальной. Это требование является важнейшим условием получения осветленной стекломассы, так как эта скорость должна быть ниже скорости выделения из стекломассы пузырей минимального размера:

$$W_{\text{пот}} < \frac{g \cdot d_{\text{min}}^2}{12 \cdot \vartheta}, \quad (3.2)$$

где $W_{\text{пот}}$ – скорость нисходящего движения стекломассы, м/ч; g – ускорение силы тяжести, м/ч; d – минимальный диаметр пузырей, присутствующих в стекломассе, м; ϑ – кинематическая вязкость, м²/ч.

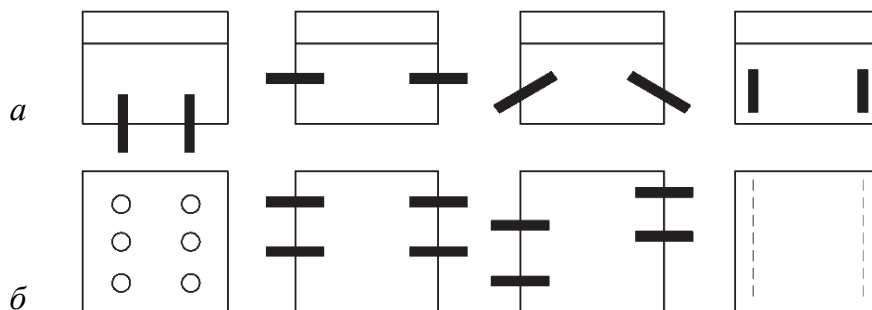


Рис. 3.18. Различные схемы расположения электродов в электрических печах:

a – продольный разрез; *б* – план печи

В присутствии работающих металлических электродов в расплаве изменяется окислительно-восстановительное равновесие в сторону восстановительных процессов. Поэтому при переходе от пламенной варки к электрической необходима коррекция рецепта шихты на содержание сульфата натрия, сурика, криолита, мышьяка, селитры, различных красителей и пр. При использовании керамических электродов из диоксида олова в расплаве поддерживается окислительная среда.

Заданный режим работы электрической стекловаренной печи может обеспечиваться вручную или автоматически по температуре, а также по току, мощности или другим параметрам одной или нескольких групп электродов. В первом случае управление ведется по показаниям термопары, погруженной в стекломассу, в остальных случаях – по показаниям электроизмерительных приборов, причем периодически производится корректировка заданных параметров по результатам глубинного пирометража.

В промышленных условиях получили распространение электрические печи сопротивления с прямым нагреванием стекломассы (для варки небольших объемов стекломассы используют также индукционные печи и электропечи с косвенным нагреванием).

По расположению электродов электрические печи делят на печи с одним рядом электродов по высоте и с многорядным расположением электродов, а также печи с донными электродами (рис. 3.17, 3.18).

Варочные бассейны электрических печей могут иметь в плане квадратную, прямоугольную, многогранную и круглую форму.

Первые два типа печей получили наибольшее распространение. По виду подводимой энергии имеются печи одно-, двух- и трех-фазные.

Бассейн квадратных и прямоугольных электрических печей мало отличается от бассейна традиционных стекловаренных печей. Размеры его составляют от 0,5 до 20 м², хотя за рубежом уже работают крупные электрические печи площадью 150–200 м².

В последнее время широкое распространение получили печи смешанного типа, где за счет выбора схем электрического питания осуществляется как продольное, так и поперечное взаимодействие боковых электродов (рис. 3.19).

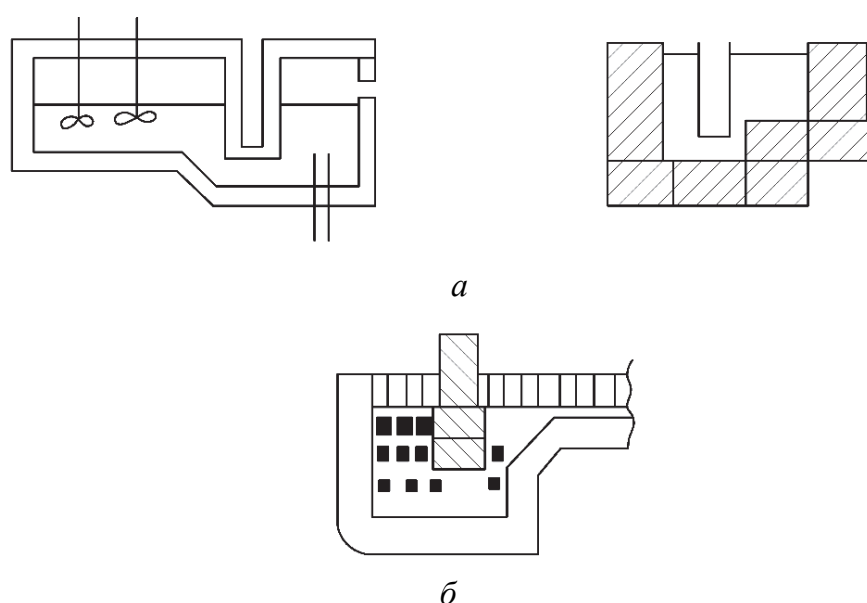


Рис. 3.19. Электropечи для производства сортового стекла:
 а – Гусевского хрустального завода;
 б – Санкт-Петербургского завода художественного стекла

Производительность наиболее распространенных электрических печей находится в пределах 0,4–6,0 т/сут.

Таким образом, опыт применения электроэнергии в стекловарении свидетельствует, что в производстве сортового стекла и хрусталя электрические печи экономически более выгодны, чем пламенные. Для варки свинцового хрусталя получили распространение печи глубинного типа с окисно-оловянными электродами. В таких печах (при производительности более 3 т/сут) осуществляют разделение варочной части на несколько тепловых зон. Это достигается многоярусным расположением электродов и подключением каждого яруса к отдельному источнику питания.

В отечественной практике имеется опыт варки свинцового хрусталя в однофазных электростекловаренных печах. Такие печи просты в эксплуатации. Кроме того, управление однофазными печами в отличие от трехфазных не требует сложных систем регулирования.

Однако при расширении объемов внедрения электростекловарки хрусталя и разработке агрегатов большой единичной мощности применение однофазных электропечей не рационально, так как увеличение мощности свыше 100 кВт приводит к перекосу фаз в системе электропитания предприятия.

Электропечь для варки свинцового хрусталя состоит из варочной и выработочной частей, соединенных заглубленным протоком. Для полного слива стекломассы из печи в варочной части предусмотрено отверстие, которое при нормальной работе закрыто бакоровой плиткой и холодильником. Стены нижнего строения печи выложены из бакора-33, верхнего – из диасового огнеупора. Снижение теплотерь стен печи достигается применением базальтоволокнистой изоляции. Под печи изолирован шамотным брусом толщиной 500 мм.

Подвод электрического тока к стекломассе осуществляется окисно-оловянными электродами размером (200×200×100) мм. В варочной части печи предусмотрены четыре пары электродов (по две пары на каждую фазу), в протоке и выработочной части – по одной паре. Электроды удлиненного протока установлены на разных уровнях по вертикали. Применение удлиненного протока с электродами прямоугольной формы на разных уровнях позволяет разрабатывать электростекловаренные печи подобного типа глубиной до 2 м и более, в которых исключается возможность затвердевания стекломассы в протоке.

Как показала эксплуатация, такая установка электродов в протоке создает удовлетворительную термическую однородность стекломассы.

Для охлаждения наружной поверхности электродов применены водяные холодильники. Разработанная конструкция крепления холодильников дает возможность регулировать усилие прижатия их к поверхности электродов и в то же время обеспечивать электрическую изоляцию обвязки печи.

Применяемые в электрических печах электроды из традиционных материалов – молибдена, стали или графита не могут быть использованы при варке свинецсодержащих стекол, так как

восстанавливают PbO до металлического свинца. Для электроварки стекол, в состав которых входят легковосстанавливающиеся оксиды (PbO , As_2O_3 , V_2O_5 и т. д.), требуются электроды, не создающие восстановительной среды в стекломассе.

В отечественной промышленности и зарубежных странах большое внимание уделяется электропроводным материалам на основе диоксида олова, а также электрическим стекловаренным печам с электродами на основе этого материала. Плоские оксидно-оловянные электроды имеют сравнительно низкую допустимую плотность тока на рабочей поверхности ($0,5\text{--}0,6 \text{ А/см}^2$), а расплав хрусталя при температурах варки отличается высокой электропроводностью, поэтому необходимы большие расстояния между противоположными электродами в группе. При этом в несколько раз меньшими оказываются расстояния между группами (ярусами) электродов, что обуславливает сильное взаимодействие групп. Протекание тока между ярусами электродов вызывает чрезмерно большое выделение энергии около боковых стен печи. Взаимодействие групп существует как при однофазном, так и при многофазном питании печи.

Для предохранения электродов от химического восстановления и с целью плавного и равномерного разогрева проточного бруса выводку и наварку печи осуществляют нетрадиционным для электрических печей способом. Перед разогревом печи варочный бассейн полностью загружается стеклобоем. По мере оплавления стеклобой добавляется в бассейн с таким расчетом, чтобы все электроды были закрыты расплавом стекла или стеклобоем. После разогрева и наварки вводятся в действие группы электронагрева, начиная с верхней. Затем варочный бассейн быстро закрывается плотным слоем шихты.

Электроды из диоксида олова широко используются при варке свинцового хрусталя и других стекол, содержащих до 50 мас. % PbO . Имеется успешная попытка варки стекол, содержащих более 70 мас. % PbO , в ванной печи вместимостью около 1 т стекломассы. Однако срок службы электродов в расплавах высокосвинцовых стекол существенно меньше, чем в печах для варки хрусталя. Величина и характер коррозии электродов на основе SnO_2 зависят от многих факторов, в частности от структуры керамики. Для продления срока эксплуатации оксидно-оловянных электродов в расплавах высокосвинцовых стекол, содержащих более 70% PbO , необходимо снизить температуру варки до $850\text{--}900^\circ\text{C}$. При этом желательно

использовать наиболее плотные электроды с размером зерен свыше 30–40 мкм. Для того чтобы поддержать постоянную однородность сваренной стекломассы при подаче к месту выработки и, в особенности, чтобы предотвратить улетучивание PbO , стекломассу пропускают через полностью закрытый канал при заполнении всего поперечного сечения (рис. 3.20).

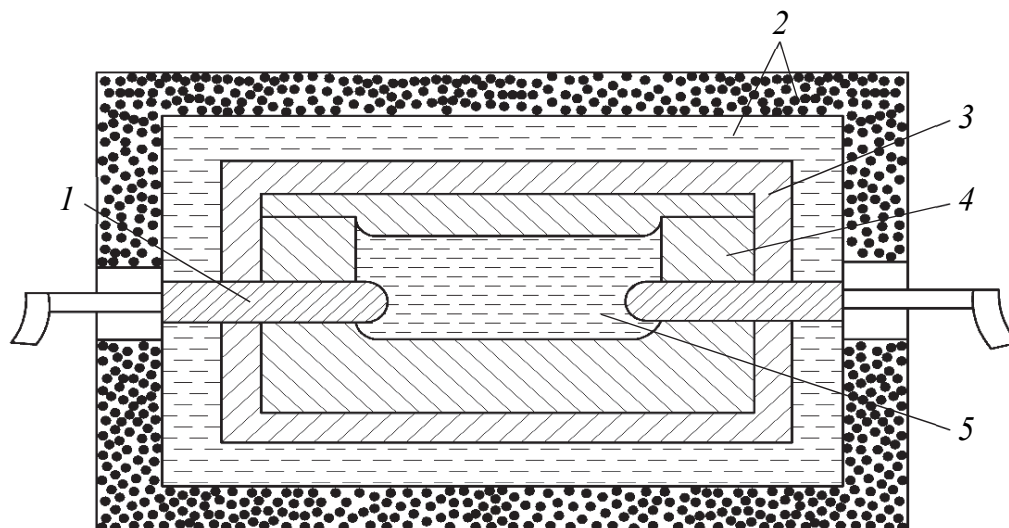


Рис. 3.20. Схема канала питателя для свинцового стекла:
1 – электрод из SnO_2 ; 2 – изоляция; 3 – нагревательная рубашка;
4 – канал из электроплавляемого огнеупорного материала;
5 – стекломасса

В канале предусмотрен дополнительный электрообогрев с помощью электродов из SnO_2 . Другим источником тепла является нагревательная рубашка, которая окружает стены канала и обогревает их, препятствуя образованию температурного градиента в стенах и в расплаве.

В месте для набора стекломассы предусмотрен ее подогрев с помощью электродов. В результате этого образуется небольшой конвекционный поток, выносящий свежую стекломассу к поверхности. Тепловые потери вследствие ухода тепла через рабочее окно компенсируются подводом тепла от радиационных нагревательных элементов, расположенных сверху. Потери тепла стенками канала компенсируются за счет использования нагревательной рубашки.

Следует отметить, что при электротоварке стекла остается проблема получения высококачественной стекломассы. Основным и наиболее трудно устранимым видом брака, особенно в производстве изделий из хрусталя, является свиль, которая может иметь как термическую, так и химическую природу.

Известно, что способность стекломассы «замораживать» свою структуру дает ей возможность «замораживать» и локальные различия в температуре. В то же время одним из условий получения качественных стеклоизделий является термическая однородность стекломассы. Причины возникновения химической свили очень разнообразны: неоднородность шихты; расслоение стекломассы; подмешивание в нее слоев, возникающих на границе расплав – огнеупор и т. д. В связи с этим важным условием для получения изделий высокого качества является тщательная гомогенизация стекломассы по химическому составу.

Обычно в промышленности для решения этих задач используют перемешивание стекломассы. При ручной выработке стеклоизделий мешалки устанавливают в выработочном бассейне стекловаренной печи. По-видимому, такое решение правильное, так как выработочный бассейн – это наиболее удобное место установки мешалки. При механизированном производстве перемешивающие устройства обычно располагают в питателе стеклоформирующей машины, причем стремятся разместить их как можно ближе к очку. Однако, как показывает теплотехническое обследование питателей, температура центральных слоев стекломассы в них может отличаться от температуры периферийных слоев на 35–40°C, что соответствует разнице в показателях преломления – 0,001, вполне различимой человеческим глазом. В процессе перемешивания такие слои сближаются, и если времени для термического усреднения недостаточно, то при выработке изделий на них будет свиль. Следовательно, после перемешивания стекломассы должен быть определенный участок для ее термического кондиционирования. Иными словами, гомогенизирующий узел должен располагаться между стекловаренной печью и зоной кондиционирования. В электрических печах таким местом может служить вертикальный канал, соединяющий проток и канал питателя. Из-за небольшого сечения его канала стекломасса может быть хорошо перемешана одной мешалкой, а дальнейшая подготовка ее к выработке будет осуществлена в питателе.

Для питания электрических стекловаренных печей используются однофазные и трехфазные печные трансформаторы ТПО и ТПТ мощностью от 25 до 250 кВт, разработанные для электротермических установок. В более мощных печах с успехом могут работать индукционные регуляторы мощностью до 1000 кВт, масляные трансформаторы серии ТМ и специальные печные трансформаторы

мощностью до 2000 кВт и более типа ЭОМН и ЭТМН и т. п., применяющиеся в металлургических печах.

Для поддержания стабильной работы электрической печи источники питания должны обеспечить плавную регулировку напряжения. Эта задача решается с помощью индукционных регуляторов, имеющих плавную настройку входного напряжения, а также в случае использования трансформаторов ЭОМН и ЭТМН со ступенчатым регулированием напряжения через 1–2 В в широком диапазоне. Трансформаторы ТПО, ТПТ и ТМ нуждаются в дополнительных регулирующих трансформаторах типа РОТМ и РТТМ или других устройствах – магнитных усилителях, тиристорных регуляторах и т. д. Для уменьшения массы установленного оборудования можно использовать вольтодобавочные трансформаторы, позволяющие регулировать напряжение в пределах одной или нескольких ступеней основного трансформатора.

В последнее десятилетие развитие электроварки приняло еще большие масштабы. Главные тенденции в развитии электропечей в настоящее время сводятся к следующему:

- замена естественной конвекции на принудительную за счет свободного перемещения большого числа электродов;
- резкое повышение единичной мощности печи;
- решение с их помощью экологических проблем;
- защита молибденовых электродов с помощью различного типа покрытий или путем гальванической защиты с использованием слабого постоянного тока, что позволяет использовать молибденовые электроды в производстве хрусталя.

В литературе сообщается об освоении третьего поколения электрических печей. Это совершеннейшие стекловаренные агрегаты с удельными съемами от 1 до 10 т/м² и КПД до 80%. Область их применения – производство сортового и технического стекла. В первую очередь следует отметить двухфазные печи с холодным верхом фирмы «Тесо», в которых используется схема размещения электродов в углах квадрата (до 6 шт. в каждом углу) с подключением электродов по диагонали таким образом, чтобы они перекрывали силовым полем всю плоскость расплава на плане печи.

При повышении мощности печи и ее площади увеличивают число квадратов. Например, самая крупная печь этого типа имеет площадь 100 м² – 2 квадрата. При этом электроды вводятся в стекломассу не в отверстие в кладке стен печи, а через окна в боковых стенах наклонно по отношению к поверхности расплава под углом 10°.

Часть электрода, контактирующая с газовой средой, имеет специальное покрытие. В месте крепления электрода с электрододержателем есть уплотнение. Это создает максимальную свободу их размещения и замены, выбора расстояния между электродами для обеспечения равномерности нагрева стекломассы. Поэтому этот тип печей называется универсальным (рис. 3.21). Он получил название «Модумелт». Их особенностью является низкий плоский свод с газовой полостью и очень высокие температуры стекломассы (до 1700°C), позволяющие получать производительность 100–200 т/сут.

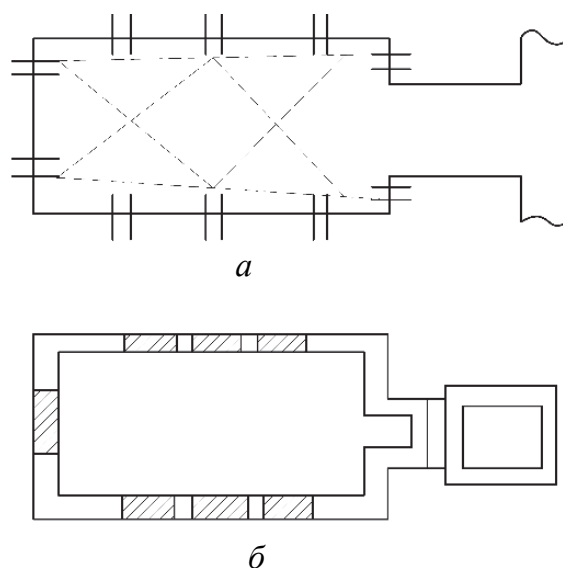


Рис. 3.21. Электропечь типа «Модумелт»: *а* – схема расположения электродов и их силового взаимодействия; *б* – план варочного бассейна

Имеются печи, в которых электроды устанавливают не под углом, а вертикально через отверстия в своде.

Фирма «Корнинг» разрабатывает, осваивает вертикальные электрические печи типа «Вермел», имеющие глубокие цилиндрические бассейны с центральным выпускным отверстием. Электроды в таких печах располагаются горизонтально несколькими ярусами. Отбор стекломассы из отверстия в центре дна печи производится с помощью молибденовой трубы, которая направляет стекломассу в горизонтальный патрубок и далее через клапан в подогревательную камеру – фидер. Печь такого типа производительностью 10 т/сут имеет диаметр 1,2 м и глубину 0,9 м. Клапан регулирует уровень стекломассы в подогревательной камере. Дно печи также имеет молибденовую футеровку. Для выводки такой печи разработана специальная технология, состоящая в подаче в печь аргона.

! 3.6. Выработка сортовых изделий

3.6.1. Ручная выработка выдувных изделий

Производство изделий ручным способом с каждым годом уменьшается. Однако ассортимент выдувных изделий, вырабатываемых ручным способом, который обеспечивает получение высокохудожественных изделий разнообразных форм, очень значителен.

Формы для выдувания. При ручном способе производства формы выполняют двоякую функцию: придают изделию конфигурацию, красивый блеск, гладкую поверхность и поглощают из вырабатываемого изделия такое количество тепла, чтобы при извлечении из формы оно оставалось прочным и не изменяло конфигурацию. Для изготовления форм в производстве выдувных художественных изделий применяют металл, дерево, цементно-угольную массу, огнеупорный материал, проволочную сетку.

Инструменты и приспособления. При ручном производстве стекла применяют различные инструменты и приспособления, позволяющие использовать приемы формования, отделки и декорирования изделий.

Для ручной выработки массовых изделий используют трубку-самодувку – приспособление для набора стекломассы и последующего выдувания изделий (рис. 3.22). Выдувание происходит при нажатии на резиновый баллон, при этом воздух поступает на выдувание под давлением 17–18 кПа.

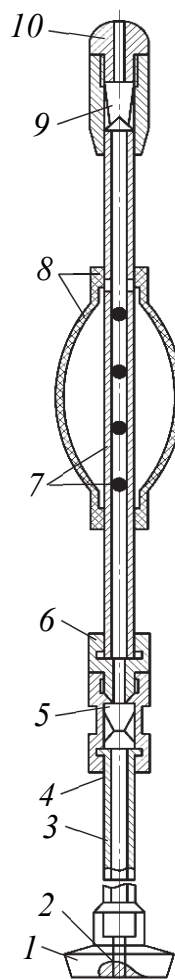


Рис. 3.22. Трубка-самодувка для ручной выработки изделий:
 1 – наборная головка; 2 – выходное сопло; 3 – предохранительное отверстие; 4 – металлическая трубка; 5 – ниппель нижнего клапана; 6 – нижний клапан; 7 – отверстия для прохода воздуха; 8 – резиновый баллон; 9 – ниппель верхнего клапана; 10 – верхний клапан

Кувшины, вазы, изделия на ножке и некоторые другие требуют отделки. Для удерживания изделий используются хватки и понтии. Для набора стекла, необходимого при отделке изделий, служит наборная железка. Для отделки изделий применяют также различные сошки, выполненные обычно из березы, ольхи или других листовенных пород. Сошками оттягивают части изделий (например, горло графина) и заглаживают поверхность. Лишнее стекло обрезают ножницами. Имеются также разводные ножницы (в виде пинцета). Некоторые виды инструментов и приспособлений показаны на рис. 3.23.

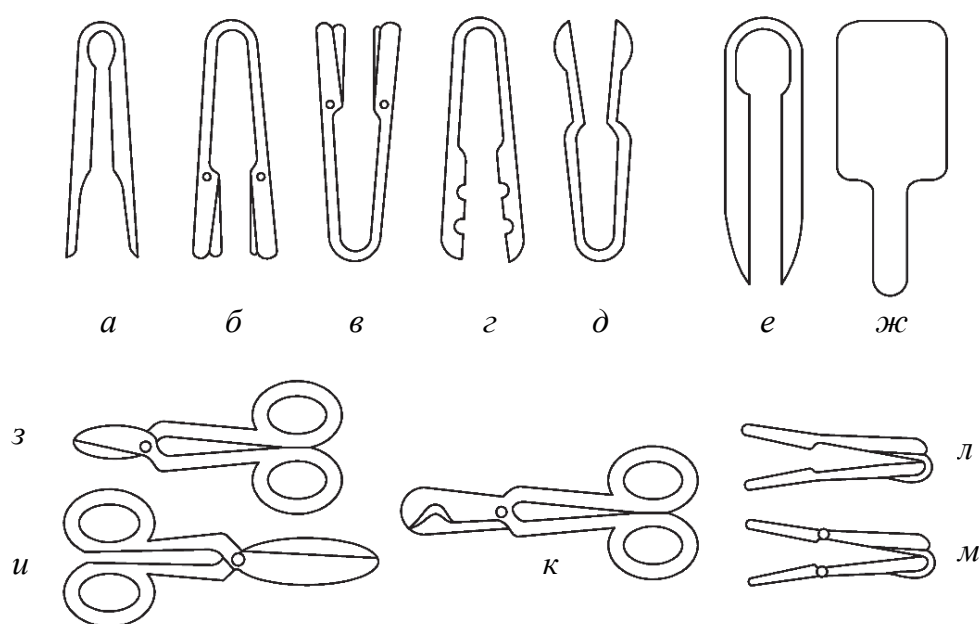


Рис. 3.23. Инструменты и приспособления, применяемые при ручной выработке изделий:

а–д – ножницы для отделки стекла;
е – щипцы; ж – гладилка; з–к – ножницы для резки стекла;
л, м – сошки

Основные операции по выдуванию изделий. При изготовлении любых изделий из стекла предварительно выдувают так называемую баночку, имеющую вид сферического пузыря с небольшой полостью. При этом используется свойство стекла плотно приставать к горячему металлу. Перед набором конец трубки разогревают, а потом опускают в стекломассу. Прикоснувшись к поверхности стекла, начинают вращать трубку, чтобы стекло набралось на нее. Когда набрано достаточное количество стекломассы, конец трубки поднимают, не переставая вращать.

Стеклу, набранному на трубку в виде комка неправильной формы, перед выдуванием баночки необходимо придать правильную форму и гладкую поверхность. Для этого набору стекла придают вид продолговатого цилиндра на железной или чугунной плите, которую устанавливают на специальной подставке.

Выдувание баночки. От качества изготовления баночки, правильности ее формы, соотношения боковых стенок и сферического дна зависит результат выдувания. Баночка должна иметь стенки одинаковой толщины. Прежде чем набрать следующую порцию стекла, баночке дают возможность охладиться и окончательно затвердеть. Затем трубку с баночкой снова вводят в печь и, вращая трубку, набирают столько стекла, сколько нужно для изделия. В последнее время при изготовлении изделий массового ассортимента используются металлические баночки. Набору придают определенную форму и заглаживают его поверхность в катальнике.

После того как заготовка окончательно подготовлена, приступают к третьей, основной, стадии формования: заготовку раздувают до требуемого размера, одновременно придавая ей окончательную форму. Выдувание может быть выполнено в форме и без нее (свободное выдувание).

Описанным выше способом вырабатывают изделия несложной конфигурации. Изделия сложной формы – графины, кувшины, вазы для цветов, а также изделия на ножке (рюмки, бокалы, фужеры, вазы для фруктов и др.) подвергают отделке. Процесс этот трудоемок, поэтому малопроизводителен. Для примера рассмотрим изготовление некоторых из этих изделий.

Изготовление графина. После подготовки пульки и выдувания изделия в форме графин берут в хваток, отделяют от трубки и разогревают его горло в печи. Горло обрезают ножницами, заравнивают и развертывают отделочными ножницами. Горло графина должно иметь одинаковый диаметр, иначе притирка пробок будет затруднена. Пользуясь различными приемами, можно вырабатывать графины различной формы, в том числе и с ручкой.

Изготовление кувшина. Подготовленную пульку выдувают в форме обычным способом, затем нижнюю часть кувшина берут в хваток или ко дну прилепляют понтию и отделяют трубку с колпачком. Место отделения колпачка разогревают в печи, расширяют край и ножницами обрезают его, придавая нужную форму и оттягивая носик. Для ручки подготавливают небольшую порцию стекла, оттягивают и прикрепляют к корпусу кувшина. После этого

отрезают набор, прилепляют второй конец набора и расправляют ручку, придавая ей требуемую форму.

Изготовление изделий на ножке (типа рюмок). Производит изделия бригада в составе 3–9 человек. Этот трудоемкий процесс включает выдувание сосуда, изготовление ножки и доньшка (рис. 3.24). Выдувание сосуда осуществляется ранее описанным способом. Для изготовления ножки и нижней части сосуда прилепляют необходимую порцию горячего стекла, из которой пинцетом раскатывают ножку требуемой формы. Для оформления доньшка к ножке снова прилепляют небольшую порцию горячего стекла, которую раскатывают до необходимой формы и размеров лещедками.

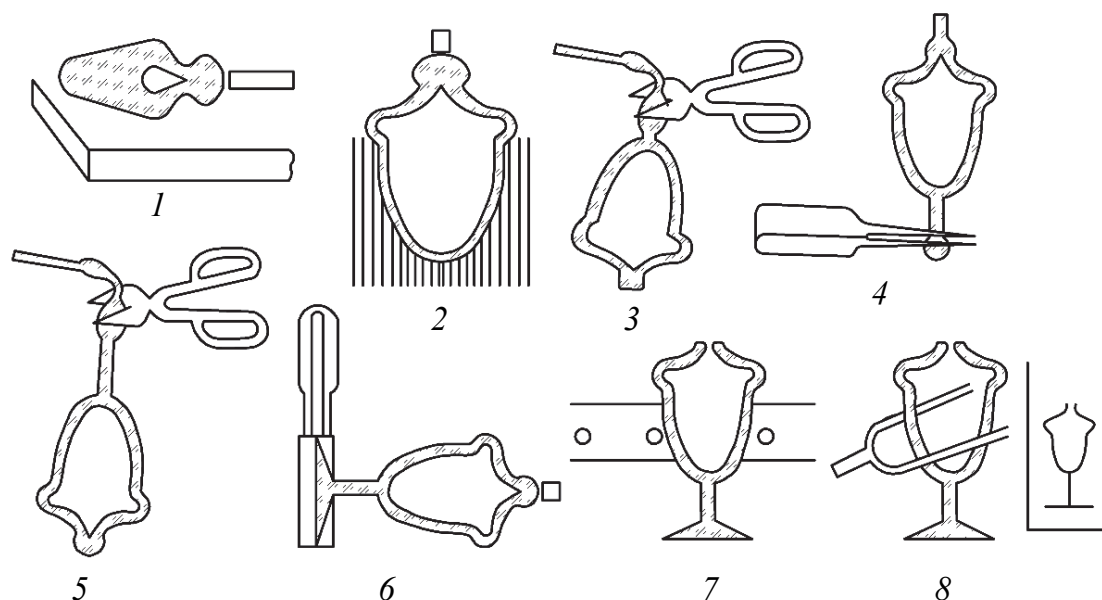


Рис. 3.24. Последовательность операций (1–8) при изготовлении изделий на ножке

Вакуумно-выдувной способ выработки изделий заключается в формировании черновой пульки с одновременной оттяжкой ножки с помощью вакуума и окончательном выдувании изделия (рис. 3.25, а). Нераскрывная черновая форма вакуумно-выдувной установки соединяется с вакуумной магистралью. При нажатии на педаль, которая соединена с клапаном вакуумной магистрали, в нижней полости формы создается разрежение и происходит заполнение ее полости стекломассой (позиции I и II). Полученную заготовку с ножкой переносят в чистовую форму и выдувают обычным способом (позиция III). Далее прилепляют порцию стекла и раскатывают доньшко. Этим способом можно формовать изделия с цилиндрической

и конусной ножкой высотой до 100 мм. При соответствующей обработке нижней части черновой формы можно получать ножку с гранями.

Дальнейшее развитие этого способа позволило вырабатывать изделия с фигурной ножкой (рис. 3.25, б). Фигурную ножку формируют в раздвижном приспособлении, которое в сомкнутом положении образует фигурную полость (позиция I). Перемещение частей приспособления в противоположные стороны позволяет свободно удалять изделие из формы (позиция II).

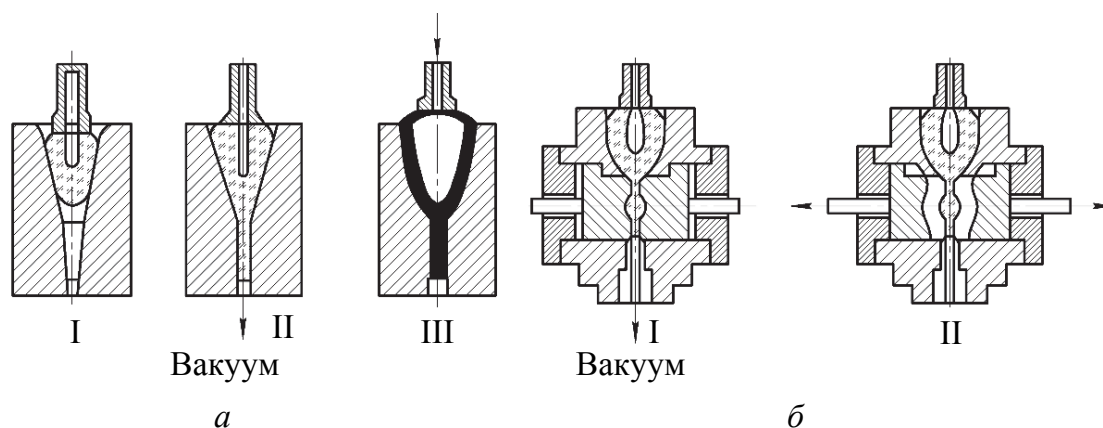


Рис. 3.25. Схемы формования выдувных изделий с вакуумной оттяжкой ножки

Вакуумно-выдувной способ выработки рюмок, бокалов и фужеров весьма экономичен и высокопроизводителен. На выработке изделий может быть занято всего четыре человека (один отделщик, два выдувальщика, один наборщик). Производительность труда значительно выше по сравнению со старым способом, повышается культура производства за счет уменьшения числа рабочих на верстаке, улучшаются условия труда.

Наряду с вакуумной оттяжкой ножки на ряде стекольных заводов освоена технология формования изделий способом подпрессовки (рис. 3.26). На станине 1 смонтированы основные узлы установки: пневмоцилиндр подпрессовки 2, система подготовки воздуха 3, кран управления 4, форма 6 с пневмоцилиндром запирания 5, стойка с трубкодержателем 8, в котором крепится стеклодувная трубка 7. Подогрев формы осуществляется горелкой 9, в которую подается газозвушная смесь из смесительной камеры 10. Работу на установке осуществляют следующим образом. Включают подачу газа и сжатого воздуха, зажигают горелки 9. Подают

каплю стекломассы в форму 6 и закрывают ее. Включают кран управления 4 и запирают форму с помощью пневмоцилиндра 5. Трубку с ранее выдутым сосудом изделия подают к форме и закрепляют в трубкодержателе 8. Включением крана управле-

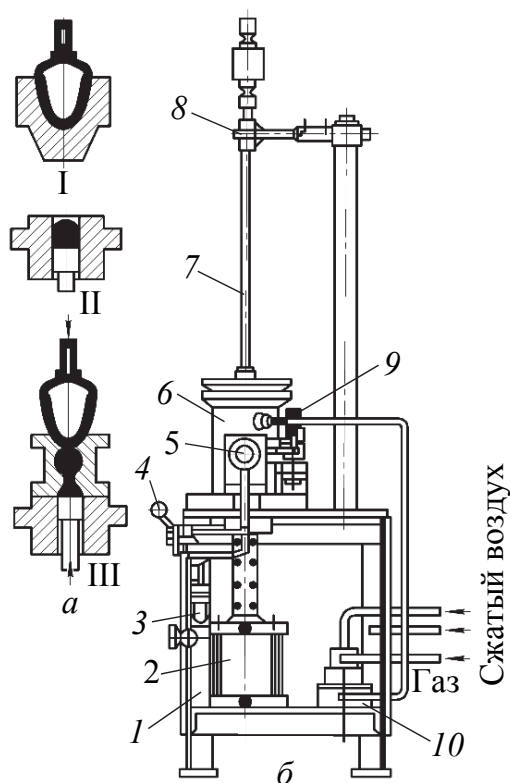


Рис. 3.26. Схема процесса изготовления изделий на ножке способом подпрессовки (а) и общий вид установки (б):

- I — выдувание сосуда;
- II — подача стекломассы для ножки;
- III — прессование ножки и соединение ее с сосудом;
- 1 — станина; 2 — пневмоцилиндр подпрессовки; 3 — система подготовки воздуха; 4 — кран управления;
- 5 — пневмоцилиндр запирающий; 6 — форма;
- 7 — стеклодувная трубка;
- 8 — трубкодержатель; 9 — горелка;
- 10 — смесительная камера

ния 4 с помощью пневмоцилиндра 2 подпрессовывают ножку к сосуду. После окончания операции отключают кран управления 4, раскрывают форму 6 и наблюдают за состоянием ножки стеклоизделия, откалывают излишек и оплавливают место откола. На заключительной стадии трубка с изделием передается мастеру-отдельщику для формирования доньшка раскаткой.

Способ подпрессовки позволяет вырабатывать изделия из хрусталя на ножке сложной конфигурации (с гранями, криволинейными переходами и т. п.). При этом не требуется дальнейшего шлифования и полирования граней ножки. Способом подпрессовки можно формировать изделия с ножкой и доньшком сразу; при этом необходимо отделять излишек стекла в нижней части доньшка и заплавлять место отделения. Способ подпрессовки при-

меняется также для изготовления декоративных сплошных изделий из стекла.

Изготовление изделий с цветным накладом и декорирование в процессе выработки. Большое влияние на прочность изделий

с цветным накладом (тонким слоем цветного стекла, плотно спаянным с основным слоем бесцветного стекла) оказывает соответствие температурных коэффициентов линейного расширения спаиваемых стекол. Для большинства применяемых в художественном стеклоделии стекол температурный коэффициент линейного расширения составляет $(70-120)10^{-7} 1/^\circ\text{C}$.

На практике для определения соответствия ТКЛР двух стекол пользуются методом кольцевой пробы (рис. 3.27). Из стекол делают двухслойный цилиндр и вырезают из него кольцо, которое разрезают по образующей. При совпадении ТКЛР стекол после охлаждения кольца линия разреза незаметна. Если ТКЛР наружного стекла больше, чем внутреннего, кольцо при остывании расходится, если меньше, кольцо сжимается, и его края заходят один за другой.

Изделия из накладного стекла изготавливают различными способами в зависимости от их вида и последующей обработки. В большинстве случаев изделия с цветным накладом изготавливают, используя цветное стекло непосредственно из стекловаренного горшка или ванной печи.

На бесцветную баночку набирают цветное стекло, из которого выдувают тонкостенный шар (рис. 3.28, а), который разогревают так, чтобы размягчалась только его верхняя половина. Затем трубку поднимают и создают разрежение внутри шара. Разогретая часть шара втягивается внутрь так, что образуется двухстенная воронка (рис. 3.28, б). Внутрь воронки помещают набор бесцветного стекла (рис. 3.28, в). Верхний слой цветного стекла смачивают водой и отбивают (рис. 3.28, г). Далее изделие изготавливают обычным путем.

Другой способ изготовления воронки применяется при изготовлении мелких изделий с цветным накладом, в частности рюмочных изделий с бесцветной ножкой. Из цветного стекла раздувают тонкостенный шар (рис. 3.28, д), верхнюю часть которого разогревают

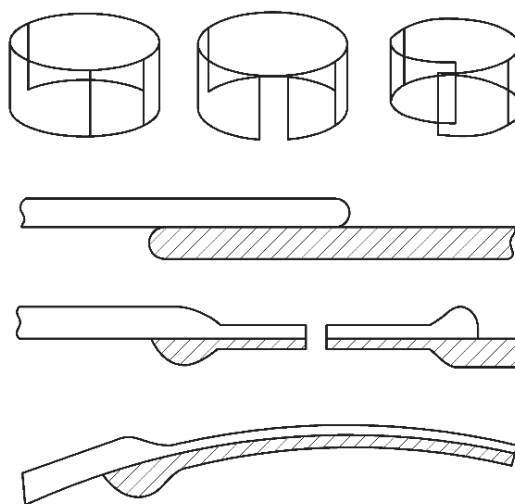


Рис. 3.27. Схема определения соответствия температурных коэффициентов линейного расширения двух стекол методом кольцевой пробы

до пластического состояния при вращении трубки (рис. 3.28, *е*). Затем, не прекращая вращения, начинают интенсивно вдувать воздух внутрь шара. В верхней части шара продувается отверстие (рис. 3.28, *ж*), которое при продолжающемся нагревании, вращении трубки и вдувании воздуха расширяется до воронки (рис. 3.28, *з*). После этого нагревание прекращают, а воронку ставят на подставку, помещают в нее набор из бесцветного стекла (рис. 3.28, *и*) и выдувают изделие обычным путем.

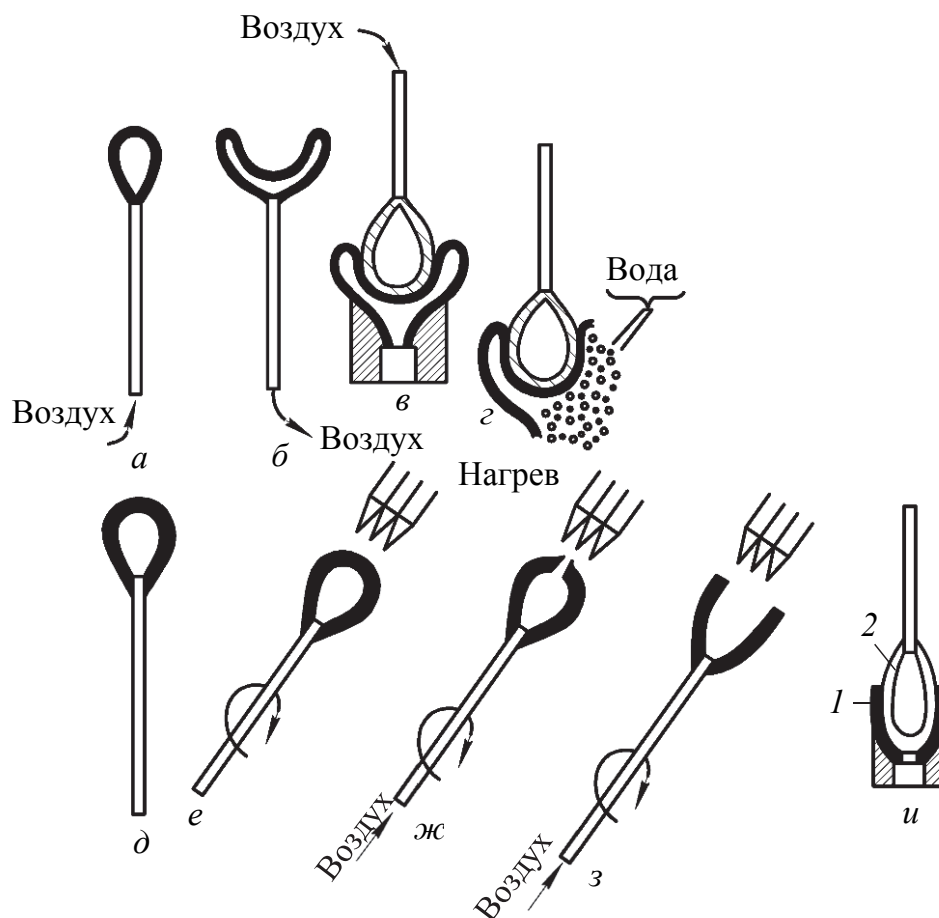


Рис. 3.28. Последовательность получения цветного наклада способом воронки:

1 – цветной слой; *2* – бесцветное стекло

Изделия с накладом из дорогостоящих цветных стекол (например, золотого рубина) получают с применением цапф, которые представляют собой отоженные сплошные цилиндры из цветного стекла.

Цветной наклад можно получить с помощью отпрессованных и отоженных заготовок из цветного стекла в виде полусфер.

Перед изготовлением изделий с цветным накладом заготовки разогревают в специальном приспособлении. Далее используется

обычная технология получения изделий с накладом. При использовании такого способа экономится цветное стекло, создается возможность централизованного изготовления заготовок для ряда заводов.

Различают полный наклад, полунаклад и частичный наклад. Выше рассмотрены способы изготовления изделий с полным накладом и полунакладом. Частичный наклад может быть в виде акварельного пятна, тонового перехода, разграниченного наклада, наклада в виде нити, крошки, колец и их вариации. На рис. 3.29 представлены два из множества приемов гутного (в процессе выработки) декорирования с использованием цветного стекла.

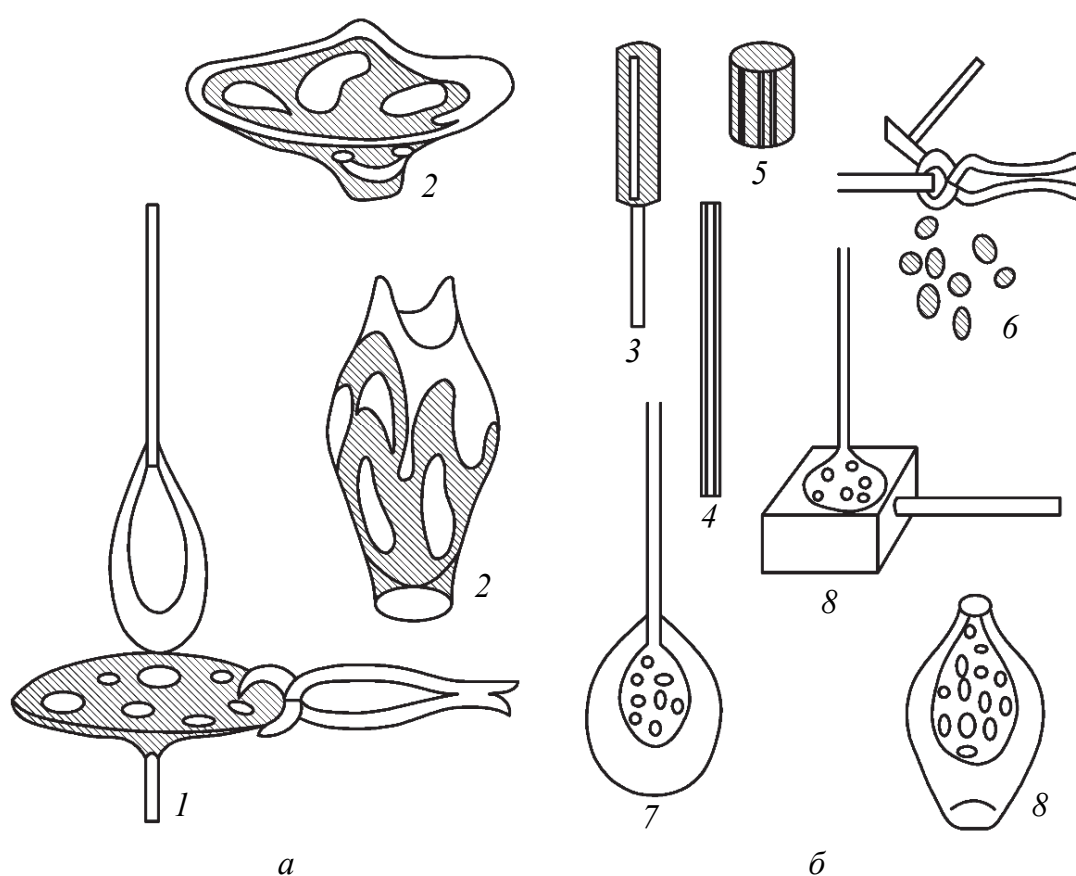


Рис. 3.29. Гутное декорирование с использованием цветного стекла:

а – прокалывание в сочетании с накладом; *б* – цветные пятна;

1 – развертка и прокалывание заготовки цветного стекла;

2 – готовые изделия; *3* – подготовка стержней к вытягиванию;

4 – вытягивание стержней; *5* – декоративный элемент из разноцветных стеклянных стержней; *6* – отсекание пластинок;

7 – соединение пластинок с первичным набором и покрытие их стекломассой вторичного набора;

8 – выдувание в форме

При ручной выработке изделий широко применяют и другие приемы гутного декорирования изделий: вдавливание, вырезание, налп, рельефное украшение поверхности, вплавление стеклянной крошки, декорирование тканями из стекловолокна, узор «кракле» и т. п. (рис. 3.30).

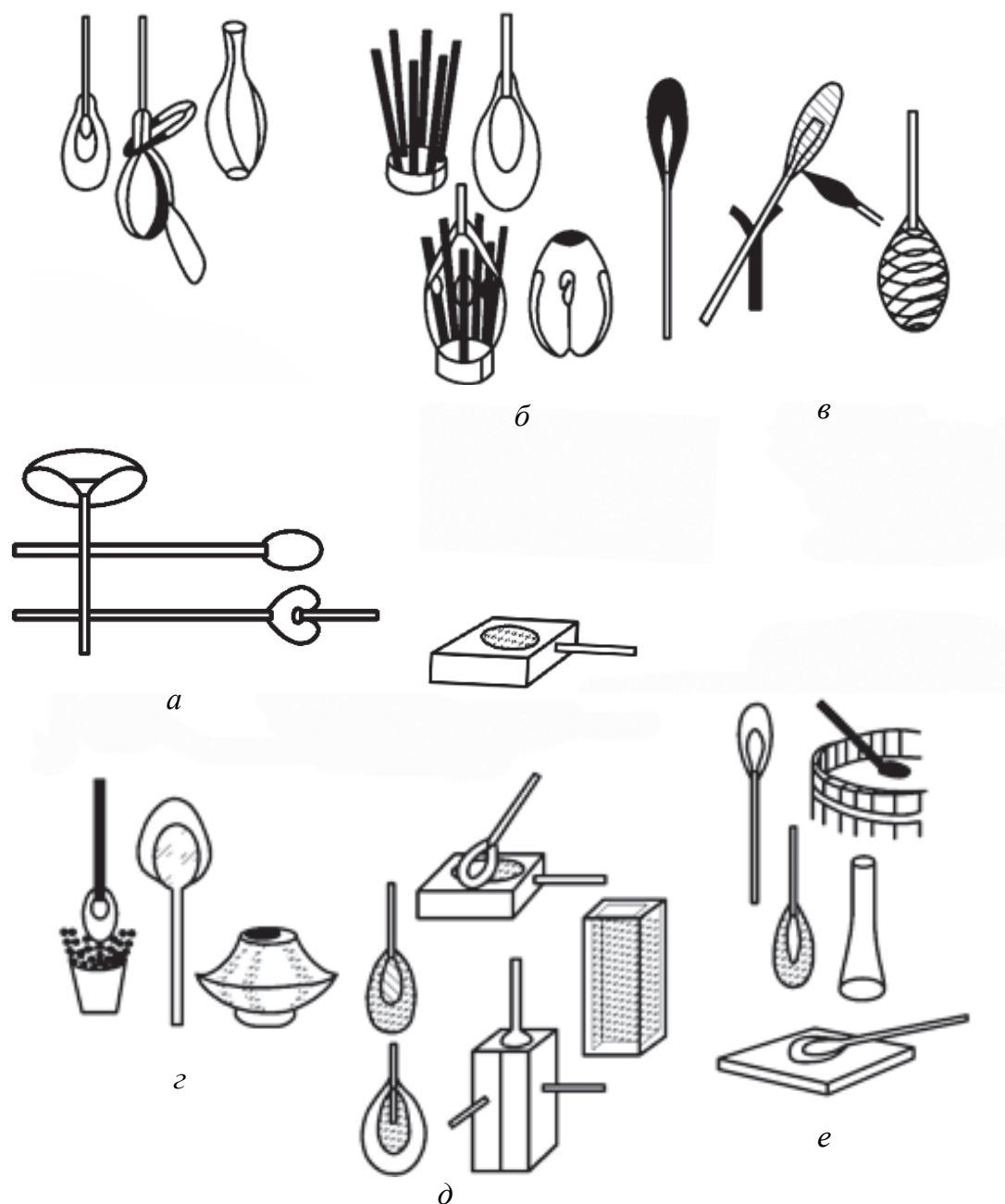


Рис. 3.30. Гутное декорирование изделий при ручной выработке:
а – свободное формование вазы для цветов и блюда с использованием приемов вдавливания; *б* – формование изделий в «оптических» формах;
в – навивка цветной стеклянной нити; *г* – украшение изделий тканями из стекловолокна; *д* – украшение изделий цветной стеклянной крошкой;
е – изготовление изделий с узором «кракле»

3.6.2. Автоматизированная выработка

Стаканы, изделия на ножке изготавливают на технологических линиях с применением различных стеклоформующих автоматов.

Производство прессованных изделий. Прессованные изделия производят на автоматических прессах. Процесс изготовления изделий на автоматическом 12-позиционном прессе с прерывисто вращающимся столом (рис. 3.31, а) следующий. На позиции 1 питателем в форму подается капля стекломассы. На позиции 2 происходит прессование изделия. После этого стекло постепенно затвердевает, когда формы проходят позиции 3–7. На позициях 8–12 изделия и формы охлаждаются.

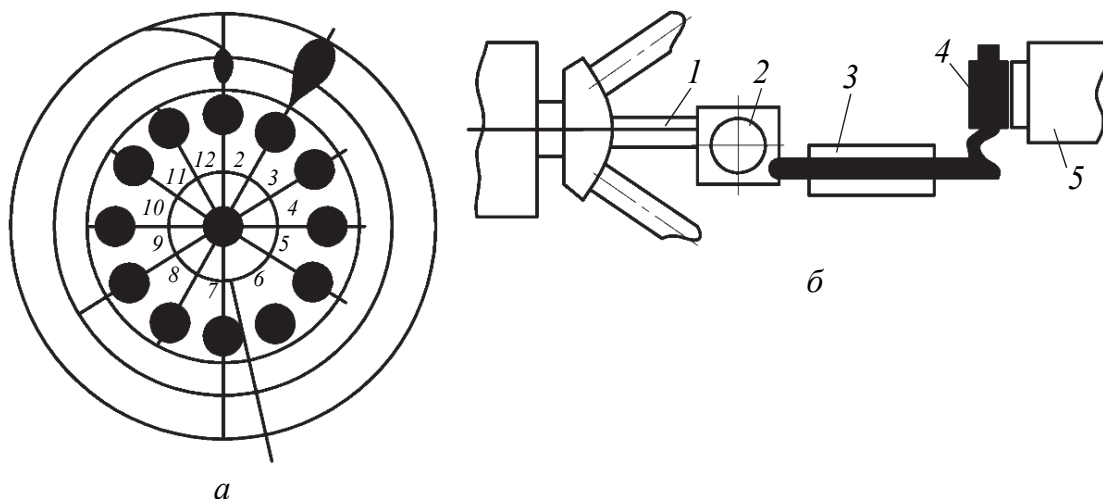


Рис. 3.31. Схемы процесса выработки изделий на прессе АПП-12 (а) и технологической линии для изготовления прессованных изделий (б):

1 – питатель; 2 – пресс; 3 – машина;
4 – загрузчик; 5 – печь отжига;

В последнее время парк отечественного прессового оборудования пополнился зарубежными прессовыми автоматами. Для получения прессованных изделий могут применяться автоматы роторного типа, в которых изделия прессуются при непрерывном вращении столов. Схема механизированной технологической линии для производства изделий из хрусталя представлена на рис. 3.31, б. Из капли стекломассы, полученной в питателе 1, на прессе 2, например АПП-12, формуется готовое изделие, которое передается на машину 3 для огневого полирования, где происходит оплавление края и облагораживание поверхности. Далее загрузчиком 4 готовое изделие передается конвейером к печи отжига 5. После отжига

и сортировки изделия в зависимости от ассортимента поступают на склад готовой продукции или проходят декоративную обработку.

Участок огневой обработки предназначен для полирования поверхности и оплавления края изделий. Участок представляет собой туннель, образованный газовыми горелками 1 и расположенными на них огнеупорными плитами (рис. 3.32). В горелки подают газозвудушную смесь. Изделия 2 сначала проходят зону полирования поверхности, а затем зону ототки края.

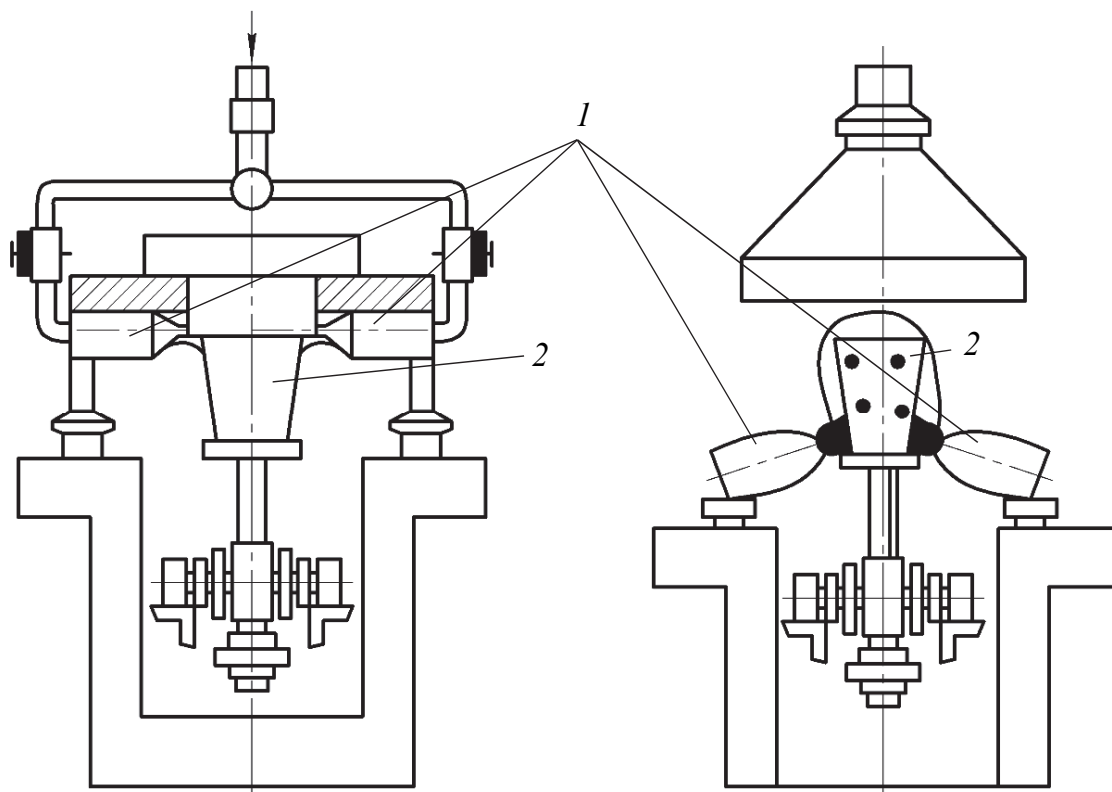


Рис. 3.32. Установка огневого полирования прессованных изделий:
1 – газовые горелки; 2 – изделия

При малотоннажном производстве широкого ассортимента прессованных сортовых изделий используются технологические линии, включающие робот-наборщик и пресс. Компанией Glass Service (Италия) предложен автоматический наборщик стекла «Smart NS» (рис. 3.33), предназначенный для питания пресс-машин.

Робот-наборщик, оснащенный системой программного обеспечения, устанавливается рядом с выработочным окном печи.

Шариковый робот-наборщик подает стекломассу на автоматический пресс, например ЕМР-320. Оператор может запрограммировать от 1 до 4 различных траекторий «руки» робота. Робот набирает первую каплю, согласно требуемым параметрам, и затем

выполняет первую траекторию, для первого формования; затем робот набирает вторую каплю и выполняет вторую траекторию, и так далее, до 4 раз в круговой последовательности. Благодаря мультипрограммной системе, робот может работать с 1, 2, 3 или 4 различными формами, подавая от 1 до 4 различных капель, с разной массой и формой. Это позволяет производить до 4 различных изделий с использованием прессы в том же самом цикле производства. Максимальный вес капли – 10 кг. Максимальная скорость 10 цикл./мин. Отрезка капли осуществляется механизмом ножниц, оборудованном на пресс-машине. После формования изделие направляется на отопку края с помощью машины огневой полировки и затем транспортируется к печи отжига.

К выдувным автоматам с капельным питанием относят формующие машины типа Olivetto (P-25, BP-24, P-28, M16/115), на которых можно формовать колбы для термосов, стаканы, сосуды к изделиям на ножке. Они названы по имени итальянской фирмы, впервые предложившей и реализовавшей идею свободного формования пульки (бесчерновой формы), что позволяет сократить парк форм, требующих ухода и ремонта.

Капля стекломассы из фидера падает на лоток (рис. 3.34, а), который направляет ее на пуансон прессующего механизма, расположенный на приемном столике. Поднимаясь вместе со столиком (рис. 3.34, б), пуансон прижимает каплю стекломассы к матрице с вакуумным держателем и прессует заготовку (таблетку). Отформованная таблетка под действием вакуума переносится и сбрасывается на одно из рабочих колец вращающегося стола машины (рис. 3.34, в), который в этот момент находится в зафиксированном положении. После сброса таблетки стол начинает вращаться. Одновременно на рабочее кольцо опускается дутьевая головка (рис. 3.34, г). Пулька растягивается вначале под собственной массой, а затем при подаче в ее полость дозированных порций воздуха. Затем форма, расположенная

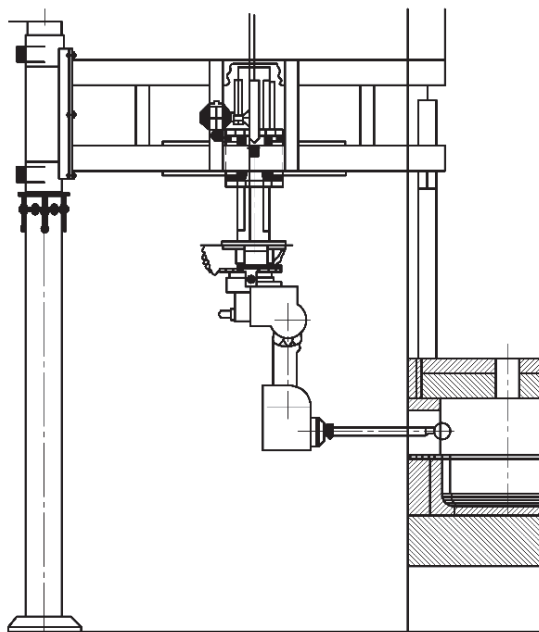


Рис. 3.33. Схема робота-наборщика Smart NS

под рабочим кольцом, закрывается, происходит окончательное (чистовое) выдувание изделия (рис. 3.34, *д*). В момент касания стекломассы внутренней поверхности формы рабочее кольцо вместе с изделием и головкой начинает вращаться, что обеспечивает получение бесшовного изделия. Затем форма открывается, дутьевая трубка поднимается, после чего положение стола снова фиксируется для загрузки следующей таблетки.

Дисковый нож (рис. 3.34, *е*) отделяет заготовку изделия от венчика. Изделие падает вниз на конвейер, а венчик на приемном столике движется дальше к устройству для очистки (рис. 3.34, *ж*), которое сбрасывает его в бункер для отходов.

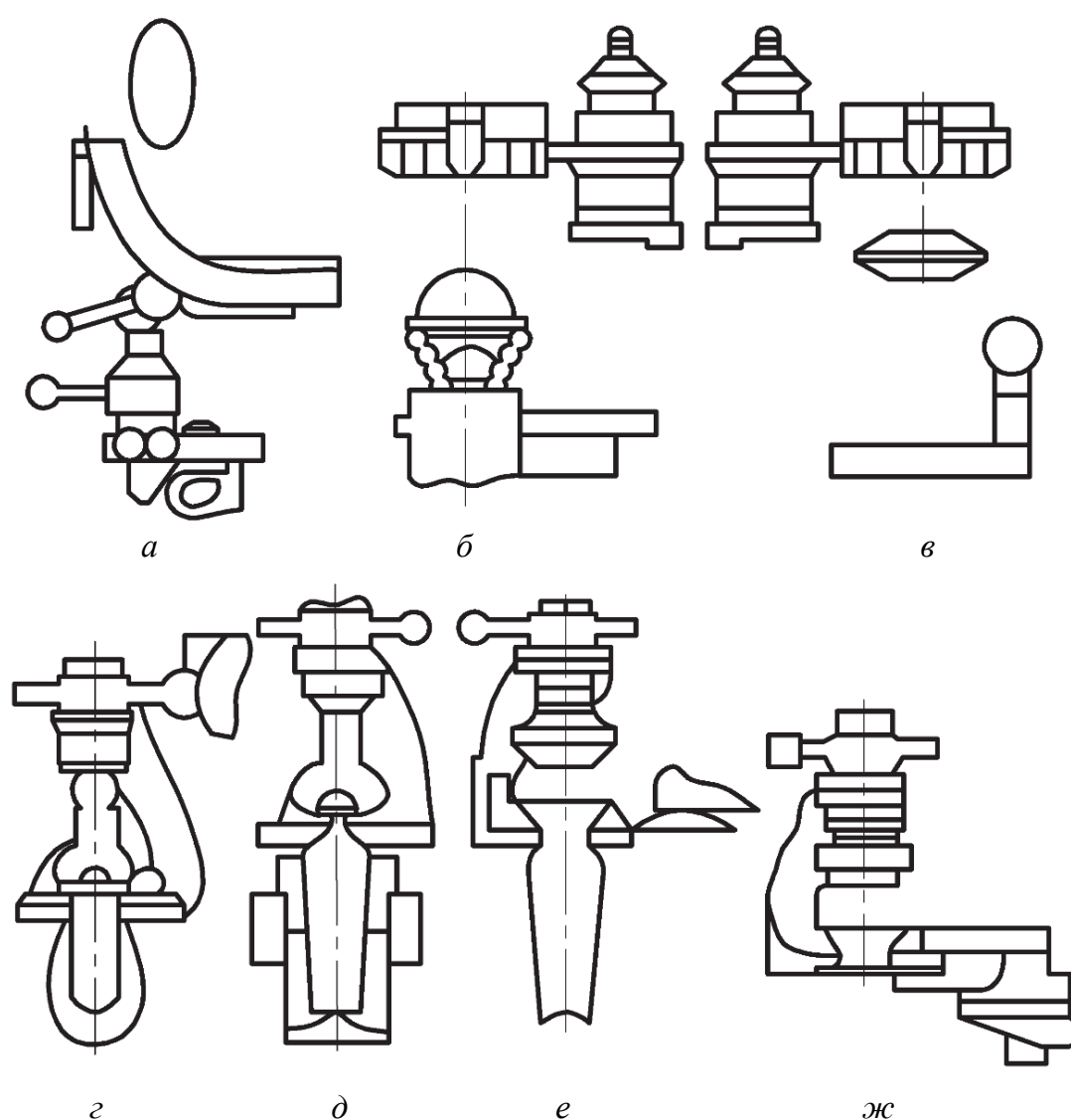


Рис. 3.34. Схема работы роторного выдувного автомата с капельным питанием для изготовления тонкостенных бесшовных изделий (стаканов)

Производство изделий на ножке. Изделия на ножке вырабатываются обычно двухстадийным способом. При этом используют два стеклоформирующих автомата: выдувную машину для формования сосуда и пресс для формования ножки с доньшком. Существует два способа изготовления изделий на ножке. По первому способу (рис. 3.35) его сосуд изделия после изготовления на выдувной машине (I) устанавливается на пресс в перевернутом положении (II) и на него напрессовывается ножка с доньшком (III).

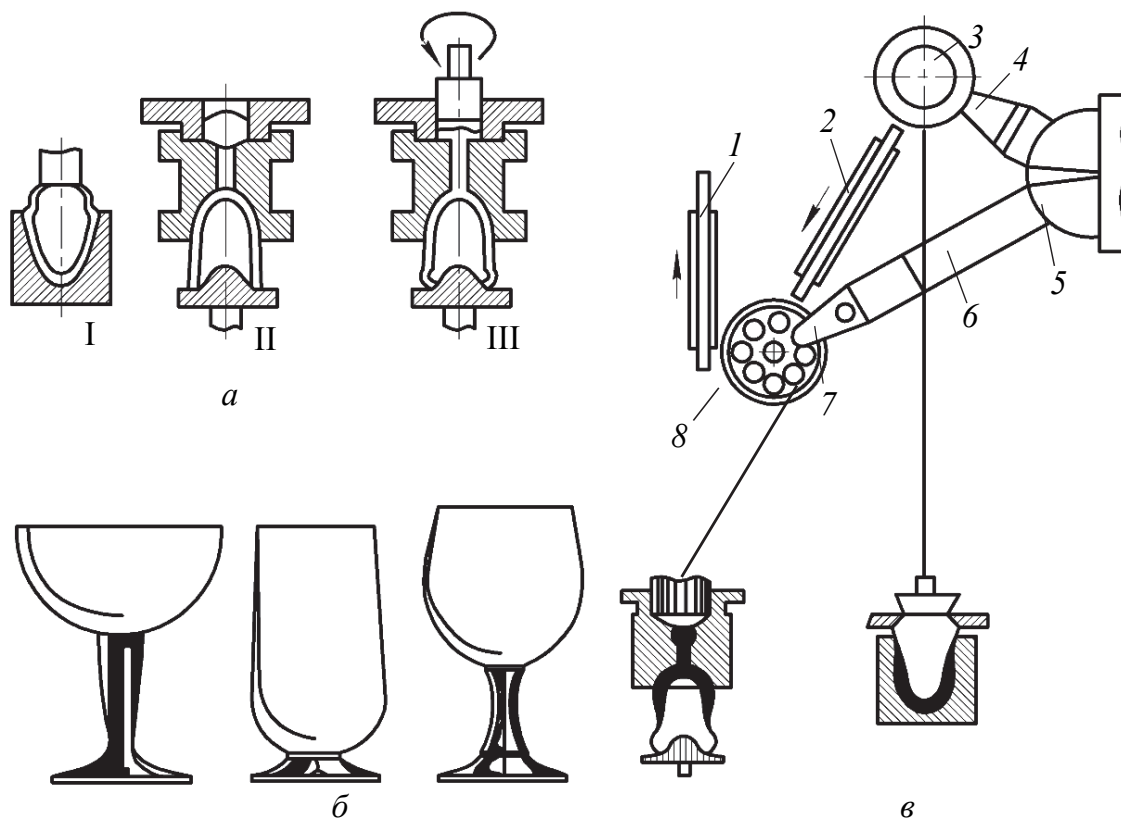


Рис. 3.35. Схемы изготовления изделий на ножке (а), виды вырабатываемых изделий (б) и технологической линии для получения изделий с цветной ножкой (в);
1 – конвейер для готовых изделий; 2 – конвейер; 3 – выдувной автомат; 4 – питатель выдувного автомата; 5 – выработочная часть печи; 6 – проток; 7 – питатель; 8 – формы пресса

Этот способ может быть использован для выработки изделий с цветной ножкой. Стекломасса из выработочной части печи 5 поступает в питатель 4 выдувного автомата, устройство для непрерывного окрашивания стекломассы 6 и в питатель 7 пресса 8. Из питателя 4 стекломасса в виде капель подается на выдувной автомат 3. На позициях выдувания автомата формуется сосуд изделия, который конвейером 2 передается на пресс 8, где устанавливается

в перевернутом положении. Одновременно из питателя 7 в формы прессы 8 подается капля цветной стекломассы. Далее прессующий механизм продавлиывает стекломассу через полость ножки и напрессовывает ее на сосуд. При этом пуансон вращается и обеспечивает гладкую поверхность формируемого доньшка. Готовое изделие по конвейеру 1 подается к печи отжига.

По второму способу (рис. 3.36) получают изделия более высокого качества. Капля стекломассы из питателя 1 подается в форму прессы 2, где на позициях прессования I формируются ножка и доньшко в положении доньшком вверх. На позиции II автоматического съема изделие удаляется из формы прессы и ставится на направляющие механизма переворота. На этой позиции изделие ориентируется в положение ножкой вверх и далее конвейером 3 передается на механизм загрузки ножек с доньшками в формы выдувного автомата 4. На выдувном автомате из капли стекломассы, подаваемой из питателя 5, формируется сосуд изделия и одновременно сваривается с ножкой (позиция III). Далее автоматический переставитель снимает изделие с автомата и ставит его на конвейер 6 для транспортировки к печи отжига 8, куда оно загружается загрузчиком 7.

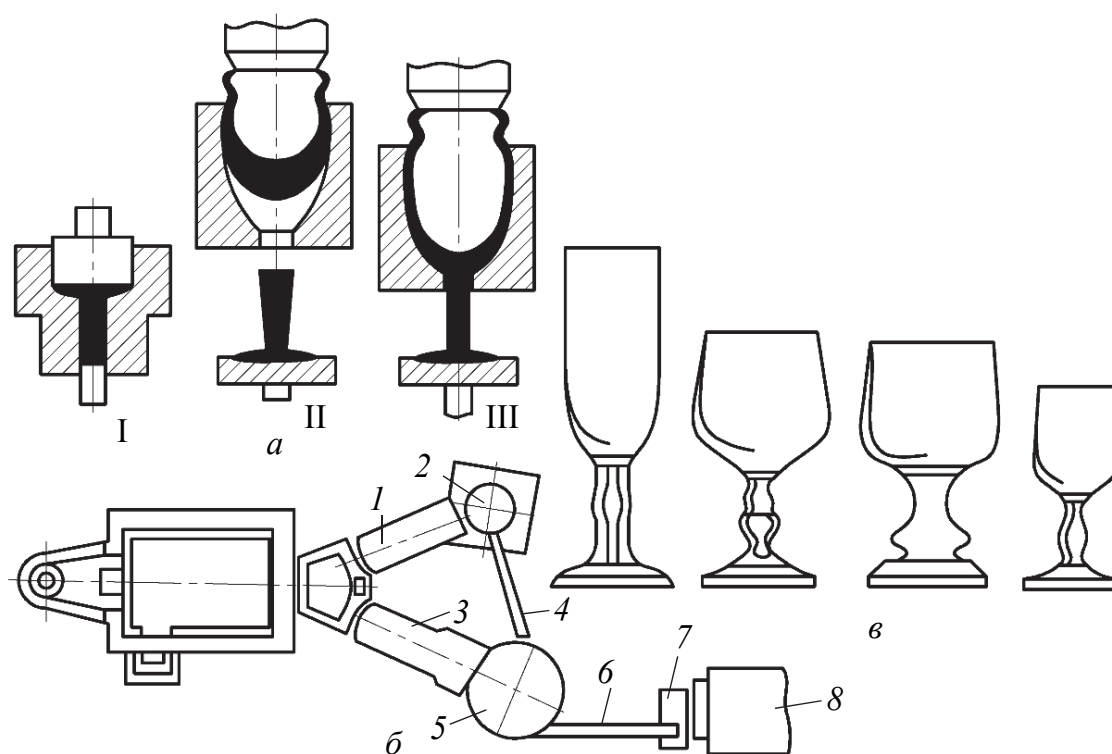


Рис. 3.36. Схемы изготовления изделий на ножке (а), технологической линии (б) и виды вырабатываемых изделий (в); 1 – питатель; 2 – форма прессы; 3 – конвейер; 4 – формы выдувного автомата; 5 – питатель; 6 – конвейер; 7 – загрузчик; 8 – печь отжига

Перспективным направлением является использование аддитивных технологий для формования сортовых изделий, сочетающих высокую точность размеров и возможность реализации смелых и необычных дизайнерских решений. Компанией Mediated Matter разработан метод изготовления стеклоизделий сложной конфигурации с помощью 3D-принтера. На рис. 3.37 представлены некоторые виды изделий, полученных с помощью аддитивной технологии.

Наборку стекломассы помещают в тигель, находящийся в камере электропечи, разогретой до температуры, обеспечивающей стеклорасплаву вязкость, требуемую для формования изделия. В нижней части печи располагается электрообогреваемое алюмини-ево-кварцево-кремниевое сопло, принцип действия которого аналогичен печатающей головке настольного FDM 3D-принтера. Расплавленное стекло вытекает из печи через сопло и экструдируется послойно на платформу.

После завершения формования изделие отжигается в камере. Для перемещения печатающей головки у принтера имеются три независимых шаговых мотора и шарико-винтовая передача. Управление моторами осуществляется с помощью драйверов Arduino.

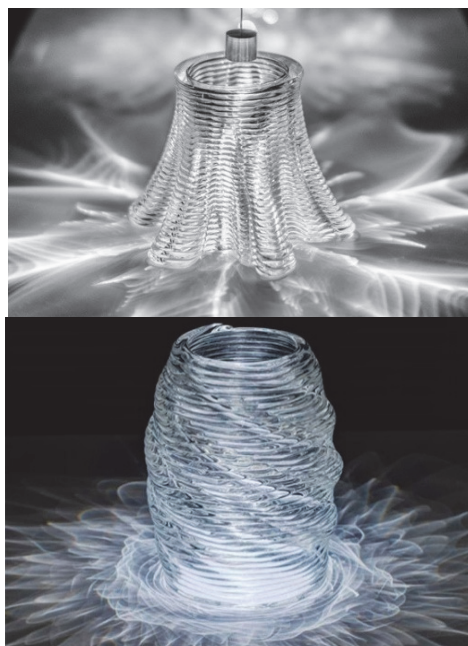


Рис. 3.37. Стеклоизделия, изготовленные с помощью 3D принтера

! 3.7. Отжиг сортовых изделий

Как известно, в связи с низкой теплопроводностью стекла в охлаждающемся свежесформованном изделии возникают градиенты температуры по толщине. В результате условно выделенные в нем слои сжимаются и твердеют неравномерно и неодновременно. Это и является причиной возникновения внутренних упругих напряжений при изменении температуры ниже T_g (температуры стеклования).

Возникшие при переходе через температуру T_g напряжения сохраняются в стекле вплоть до полного охлаждения, вследствие чего называются остаточными или постоянными. Указанные напряжения снижают прочность изделия и даже могут быть причиной его самопроизвольного разрушения.

Наряду с постоянными напряжениями при охлаждении стекла в области хрупкого состояния имеют место временные напряжения. Временные напряжения возникают только в области упругого состояния (ниже T_g) стекла и обусловлены разностью температур между его слоями. При выравнивании температуры данный тип напряжений исчезает, откуда и следует их название. Конечно, если уровень временных напряжений при быстром охлаждении превышает предел прочности, стекло разрушается.

Строго говоря, при охлаждении между слоями стекла складывается баланс сжимающих и растягивающих напряжений, величина которых зависит прежде всего от скорости охлаждения. Если охлаждение происходит быстро, напряжения между слоями могут превысить предел прочности материала, что приводит к разрушению формовки. Но если охлаждение осуществляется достаточно медленно, уровень напряжений в нем будет меньшим, слои не будут подвергаться повреждению, а сопротивление стеклоизделий механическим и термическим воздействиям будет определяться величиной остаточных напряжений.

Таким образом, отжиг – это процесс регулируемого охлаждения изделий с целью снижения остаточных напряжений до величины, безопасной с точки зрения их эксплуатации, а также предотвращения возникновения опасных для прочности временных напряжений.

Режим отжига стеклоизделий зависит от состава и свойств стекла, размеров, формы и толщины стенок изделия. Определяющим для режима отжига является интервал температур, внутри которого возникают и релаксируют остаточные напряжения. Этот интервал ограничивается высшей температурой отжига ($T_{в.о}$), отвечающей вязкости стекла в 10^{12} Па·с, и низшей температурой отжига ($T_{н.о}$), соответствующей вязкости в $10^{13,5}$ Па·с.

Известно, что при выдерживании стекла в течение 5 мин при $T_{в.о}$ исчезает 95% напряжений, возникающих в нем при нерегулируемом охлаждении. За низшую температуру отжига принимается та температура, ниже которой постоянные напряжения уже возникнуть не могут (следует опасаться только временных напряжений).

При выдерживании при нижней температуре отжига напряжения релаксируют (исчезают) существенно медленнее в сравнении с $T_{в.о}$ – при той же продолжительности выдержки исчезает только 5% напряжений. Теоретически, в соответствии с кривой $\lg \eta = f(T)$, разница между $T_{в.о}$ и нижняя температура отжига составляет 50–60°C, однако на практике для большей безопасности отжига сортовых изделий величину этого интервала принимают 90–100°C, а для массивных толстостенных изделий – до 150°C.

3.7.1. Температурный режим отжига

Отжиг сортовых изделий обычно проводят в четыре стадии разной продолжительности (рис. 3.38). На стадии 1 изделия нагревают (или охлаждают) до $T_{в.о}$ со скоростью, при которой не происходит их разрушения. Иногда обжиг проводят при температуре ниже $T_{в.о}$ на 20–30°C во избежание деформации изделий сложной формы.

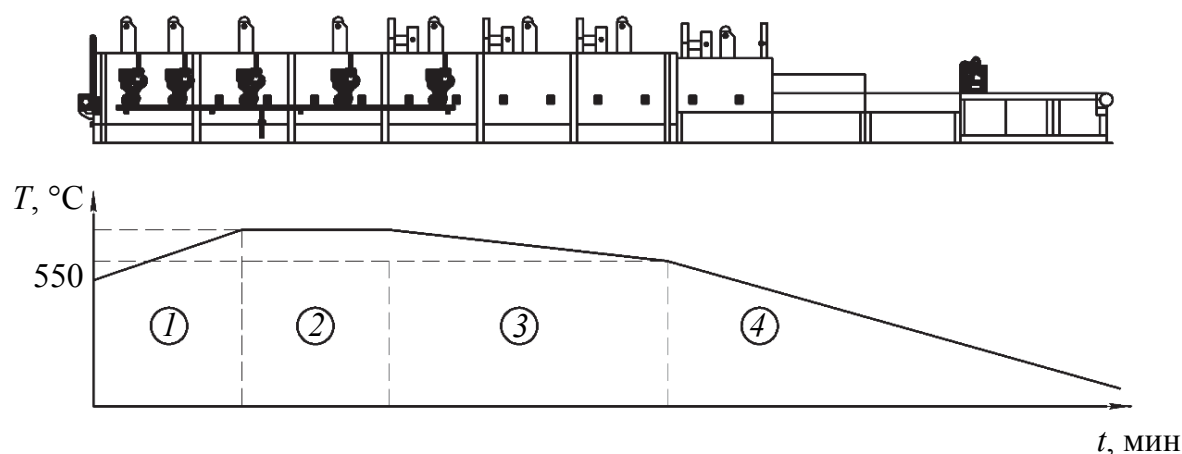


Рис. 3.38. Пример температурной кривой отжига стеклянной тары

На стадии 2 изделия выдерживают при $T_{в.о}$ или близкой к ней, но меньшей температуре, в течение времени, достаточного для снижения уровня остаточных напряжений до заданной величины. Обычно температуру отжига выбирают таким образом, чтобы предотвратить деформацию изделий (несколько ниже T_g), но обеспечить высокую скорость релаксации (ослабления) остаточных напряжений (выше $T_{н.о}$). Известно, что снижение температуры отжига на каждые 10°C увеличивает время релаксации в 2 раза. Обычно время релаксации при температуре отжига составляет от 3 до 20 мин.

На стадии 3 (ответственный отжиг) изделия медленно с рассчитанной скоростью охлаждают до $T_{н.о}$, чтобы постоянные напряжения не превысили заданный уровень.

На стадии 4 (ускоренный отжиг) изделия охлаждают быстрее, но с такой скоростью, чтобы возникающие временные напряжения в затвердевшем изделии не превысили уровень, опасный с точки зрения его целостности.

Исходя из практики отжига выработана методика расчета безопасной скорости охлаждения изделий на каждой стадии с учетом толщины их стенок.

Стадия 1. Стекло нагревают (охлаждают) до $T_{в.о}$ со скоростью $V_1 = (20 / a^2 - 30 / a^2)^\circ\text{C}/\text{мин}$, где a – толщина полых изделий, см.

Стадия 2. Время выдержки полых изделий при максимальной температуре отжига рассчитывается по формуле $t = 102 \cdot (a^2 / 2)$.

Стадия 3. Является наиболее ответственной в процессе отжига, так как при форсированном охлаждении еще могут возникать остаточные напряжения, превышающие допустимый уровень, которые устраняются только путем повторного отжига. Если допускается не более 5% остаточных напряжений, то скорость ответственного отжига может быть рассчитана по формуле

$$V_3 = 0,33 / a^2.$$

Для малоответственных изделий можно применять формулу $V_3 = (1-3) / a^2$, причем уровень остаточных напряжений при этом не превысит 20% от разрушающих.

Стадия 4. Во избежание опасных временных напряжений скорость ускоренного охлаждения определяют по формуле $V_4 = 10 / a^2$, хотя на практике на этой стадии нередко скорость охлаждения достигает 20–30 $^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Продолжительность стадий 1, 3, 4 определяется по формуле $t_i = \Delta T_i / V_i$, где ΔT_i – разность температуры в начале и конце стадии, $^\circ\text{C}$; V_i – рассчитанная скорость охлаждения на каждой стадии, $^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Обычно для каждого вида изделий разрабатывается индивидуальный режим отжига в зависимости от их назначения, формы размеров, толщины стенки, состава стекла, метода формования, уровня допустимых остаточных напряжений, типа печи отжига. Следует отметить, что в реальных условиях температура в печах отжига меняется плавно и четкое разграничение стадий отжига затруднительно.

В последнее время достигнуты определенные успехи по интенсификации отжига стеклоизделий как за счет интенсификации теплообмена в лере, путем совершенствования его конструкции, использования ИК-излучения, так и за счет допустимого повышения уровня остаточных напряжений (сокращения продолжительности 2-й и 3-й стадии отжига).

Контроль качества отжига. Распространенным методом контроля напряжений, возникающих в ходе термообработки стеклоизделий, является их просмотр в поляризованном свете. Поляризационно-оптический метод контроля основан на явлении двойного лучепреломления в стекле, подверженном воздействию внутренних напряжений, что является причиной его окраски из-за интерференции света при наблюдении в полярископе.

Интерференционная окраска позволяет только качественно оценить отжиг. Причем хорошее качество отжига характеризуется доминированием в окраске фиолетовых и красных тонов, удовлетворительное – оранжевых, голубых, голубовато-зеленых, некачественный отжиг – зеленых и желтых оттенков.

Количественная оценка уровня остаточных напряжений в стекле производится полярископами типа ПКС-500.

3.7.2. Печи для отжига сортовых изделий (леры)

Печи для отжига изделий классифицируют по режиму работы, источнику тепла, способу передачи тепла, направлению движения отжигаемых изделий и конструкции транспортирующих средств:

- режиму работы – периодического (камерные) и непрерывного (конвейерные) действия;
- источнику тепла – использующие жидкое, газообразное топливо, а также электрическую энергию;
- способу передачи тепла – прямого нагрева, муфельные и циркуляционные;
- направлению движения отжигаемых изделий – горизонтальные и вертикальные;
- конструкции транспортирующих средств – сеточные, роликовые и люлочные;

В печах для отжига должно быть обеспечено равномерное распределение температуры внутри печного пространства и точно выдержанный режим отжига стекла.

Печи непрерывного действия отличаются высокой производительностью, низким расходом тепловой энергии и более точным регулированием температурного режима.

Все типы конструкций горизонтальных отжигательных печей непрерывного действия имеют следующие общие элементы:

- туннель (канал для отжига);
- отопительное устройство;
- транспортирующее устройство (валы или сетка).

Наиболее распространены муфельные и конвективные печи, которые обеспечивают более равномерное распределение температур по сечению туннеля по сравнению с печами прямого нагрева. Вместе с тем возможности последних далеко не исчерпаны.

Использование скоростных горелок и конструкций с циркуляционными секциями обеспечивает высокие экономичность и качество отжига изделий в печах прямого нагрева.

В циркуляционных печах отжига или печах с конвективным теплообменом для выравнивания температуры по сечению туннелей организуется движение теплоносителя. Схема конвективного теплообмена в печи представлена на рис. 3.39.

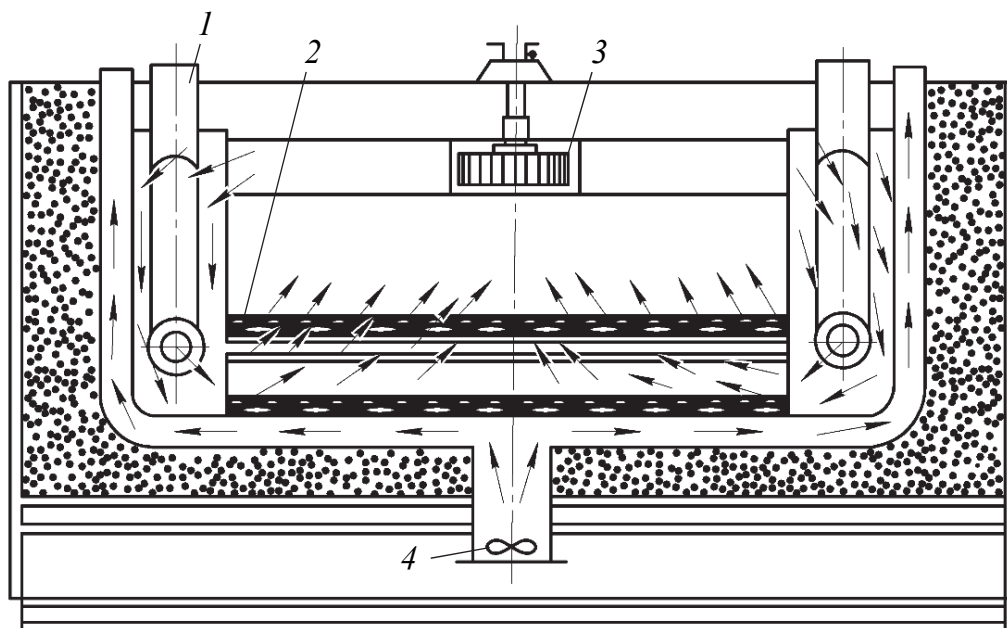


Рис. 3.39. Схема конвективного теплообмена в циркуляционной печи:

1 – нагреватели; 2 – конвейерная лента; 3 – вентилятор, забирающий горячий воздух; 4 – вентиляторы для охлаждения

Вентилятором 3 горячий воздух забирается в верхней части туннеля и поступает по боковым каналам под конвейерную ленту 2, омывая снизу вверх установленные на ней изделия. Циркулирующий воздух подогревается в боковых каналах нагревателями 1. Вентиляторы обеспечивают выравнивание температуры изделий по длине и ширине секций печи. Для обеспечения заданной

температуры по длине туннеля наряду с нагревателями имеются и охлаждающие устройства. Для охлаждения предусмотрены вентиляторы 4, подающие наружный воздух в каналы, примыкающие к нижней и боковым сторонам обогреваемой части туннеля. Эти вентиляторы автоматически включаются, если температура в той или иной секции превышает заданную. Контроль температуры осуществляется термopарами. Возможно автоматическое регулирование заданного режима отжига.

Ниже приведено описание работы лера с прямым газовым отоплением конструкции компании «Скlostрой».

Печь оснащена системой охлаждения и плавным регулированием системы запуска и остановки агрегата. По желанию заказчика печь может быть изготовлена с электрическим отоплением.

Входная часть печи имеет опускающуюся заслонку, с помощью которой регулируется входной проем туннеля. На заслонке помещен регулируемый входной ролик с кожухом, препятствующим нежелательному поступлению холодного воздуха. Туннель тепловой обработки состоит из отдельных секций. Каждая из секций представляет собой температурно-регулируемую зону. В туннеле имеется необходимое количество таких зон длиной по 2,25 м. Каждая из зон оснащена самостоятельной регулировкой подачи воздуха. Воздух проходит по всей длине туннеля печи между изделиями, всасывается рециркуляционными вентиляторами, расположенными в потолке секции, и подается в другой конец печи. Отопление зон осуществляется с помощью автоматических газовых горелок (или электрических отопительных элементов). Конструкция горелок обеспечивает низкий уровень шума как при зажигании, так и при работе. Производительность горелок регулируется в широком диапазоне. Процесс отопления управляется микропроцессорным регулирующим устройством. Данное устройство контролирует процесс горения в каждой секции на основании показателей, полученных от термоэлементов. Охлаждение в зоне управляется заслонками всасывающего и декомпрессионного каналов. Холодный воздух подается через всасывающий канал и при прохождении через рециркуляционный вентилятор смешивается с рециркулированным горячим воздухом. Избыток горячего воздуха уходит через декомпрессионный канал. Процесс охлаждения на основании данных, полученных от термоэлементов, управляется также микропроцессорным регулирующим устройством в каждой из зон печи. Выход печи представляет собой туннель с заслонкой, регулирующей высоту

открытия кожуха. Система дополнительного охлаждения содержит серию вентиляторов, которые всасывают окружающий воздух, обдувают изделия и тем самым дополнительно охлаждают их после выхода из туннеля печи отжига. Туннель тепловой обработки продолжает съемный конвейер. Первая часть конвейера оборудована отсоединяемым кожухом, следующая содержит систему натяжения транспортной ленты, а в последней части конвейера находится силовая установка транспортной ленты печи, состоящая из коробки передач с электромотором. Диапазон изменения скорости транспортной ленты управляется частотным преобразователем. В печь поставляется металлическая транспортная лента из жароустойчивого материала. Электрическое оборудование печи представляет собой щит управления, кабельную проводку и контрольные приборы на корпусе печи.

Наиболее удобны, просты и эффективны в эксплуатации печи отжига с электрическим обогревом. В них обычно применяют нагревательные элементы сопротивления, которые устанавливают в печи, регулируя их нагрев на тех или иных участках в соответствии с кривой отжига. Электрические печи получили распространение в производстве листового и профильного стекла, стеклотары, бытовых и других видов изделий.

Процесс отжига стеклоизделий в конвективных печах является довольно длительным из-за плохой теплопроводности стекла. Применение проникающего ИК-излучения, создаваемого специальными нагревателями (кварцевыми галогенными лампами накаливания), позволяет в несколько раз ускорить процесс отжига за счет быстрого выравнивания температуры по сечению отжигаемых изделий и равномерного ускоренного охлаждения. При этом ускоряется релаксация напряжений, возникших при формовании, и предотвращается появление значительных напряжений при охлаждении. Эффективность печей ИК-отжига повышается за счет применения охлаждаемых рефлекторов, предотвращающих потери энергии излучения и возвращающих эту энергию к изделиям.

Для всех типов печей потребление энергии снижается за счет применения эффективной теплоизоляции. В этом случае экономия энергии достигается при более рациональном использовании тепла, в том числе вносимого стеклоизделиями после формования.

При расчете конструктивных параметров печи отжига и ее теплового баланса определяют площадь и длину конвейера, высоту и другие размеры печи, исходя из габаритов отжигаемых изделий

и температурного режима отжига учитывают статьи прихода и расхода тепла.

На предприятии должны приниматься меры для сохранения тепла вырабатываемых изделий путем приближения печей отжига к местам выработки, тепловой изоляции конвейеров и т. п. Технологический режим в каждой печи должен контролироваться стационарными контрольно-измерительными приборами с автоматическим поддержанием температуры в соответствующей зоне.

С целью корректировки режимов отжига для стеклотарных изделий рекомендуется измерять температуру по длине туннеля передвижными термопарами, закрепленными в специальном устройстве на верхнем, среднем и нижнем уровнях отжигаемых изделий. Сравнивая полученные результаты с теоретическим расчетом и заданным режимом, можно точно отрегулировать температурный режим печи отжига.

Таким образом, в производстве стеклянной тары печь отжига, являющаяся составной частью поточной линии, выполняет функцию управления процессом охлаждения изделия с целью устранения внутренних напряжений в стекле, возникающих при твердении и охлаждении после формования.

Печь может быть адаптирована к индивидуальным условиям. Конструкторское исполнение, расход энергии и общая длина печи отжига зависят от ассортимента и объема продукции.

! 3.8. Обработка сортовых изделий

3.8.1. Термические процессы первичной обработки

Технологические процессы следуют за формованием изделий.

Обработка изделий из сортового стекла делится обычно на две стадии: первая – предварительная, в результате которой полуфабрикат превращается в готовое изделие. Эта стадия включает в себя процессы отделения колпачка, обработки края изделия, заточки дна и притирки пробок. Вторая стадия – декорирование (облагораживание поверхности) готовых изделий: нанесение резьбы, широкой грани, гравировка, украшение золотом, силикатными и люстровыми красками, медной и серебряной протравой, химическая, пескоструйная обработка и т. п.

В данном разделе рассмотрены такие процессы первичной обработки, как термическое полирование поверхности прессованных

изделий и отделение колпачка выдувных изделий. После термического полирования прессованные изделия превращаются в готовую продукцию, а выдувные подвергаются дальнейшей (вторичной) обработке для придания им более совершенного вида.

Термическое полирование прессованных изделий. Качество прессованной посуды ниже качества выдувных изделий, изготовленных ручным способом, из-за таких дефектов поверхности, как небольшие складки, морщинки, кованность и др. Со всеми этими дефектами можно успешно бороться, применяя термическое полирование поверхности прессованных изделий. Термическое полирование – процесс, при котором нагретое стекло изделия подвергается действию высокотемпературного теплового потока. При этом тонкий поверхностный слой стекла расплавляется и микронеровности и мельчайшие трещинки, образовавшиеся при формовании, под действием сил поверхностного натяжения сглаживаются. Термическое полирование повышает механическую прочность и химическую устойчивость изделий.

Особенно актуально и перспективно термическое полирование при механизированной выработке прессованных изделий из свинцово-кремнеземистых стекол, так как при этом отпадает необходимость химического полирования.

Применяют разные виды термического полирования поверхности изделий: высокотемпературным газокислородным или газовоздушным пламенем малой светимости; последовательным воздействием восстановительного и окислительного пламени (для свинцово-кремнеземистых стекол); инфракрасным излучением; низкотемпературной плазмой.

Отделение колпачка выдувных изделий. При выдувании изделия сортовой посуды обычно получают с колпачком, который необходимо удалить. Колпачок можно отделять, расплавляя стекло в узкой зоне огнем высокотемпературных горелок (в горячем состоянии), а также создавая условия для образования сквозной трещины путем нагревания и охлаждения (в холодном состоянии).

Огневая отрезка колпачка. Наряду с автоматизацией производства выдувной посуды в последнее время развивается и технология огневой отрезки колпачков стеклоизделий. Этот процесс заменяет все последующие операции обработки края (отколку, шлифование, закругление и оплавление). Существует много конструкций отрезных машин, начиная от однопозиционных станков с ручным обслуживанием до высокопроизводительных карусельных автоматов.

Технология огневой отрезки колпачка заключается в том, что расположенные кольцом факелы горелок прогревают стенку изделия в узкой зоне (рис. 3.40, *а*). Нагретый участок 2 удлиняется и утоняется и части изделия 3 отделяются. На месте отделения под действием сил поверхностного натяжения образуется утолщенный край 4.

Чтобы отрезанный край получился ровным и гладким, изделие и пламя должны двигаться относительно друг друга. Возможны два варианта: изделие вращается относительно неподвижной кольцевой горелки или горелка вращается вокруг неподвижного изделия.

При нагревании узкой зоны стекла одновременно с уменьшением вязкости стекломассы в этой зоне вниз действует сила растяжения, обусловленная массой колпачка. Толщина стенки в зоне нагревания уменьшается. Равномерность утонения зависит от равномерности толщины стенки по всему периметру изделий. Так как в большинстве случаев толщина стенки неодинакова, качество отрезки края невысокое. Одновременно с отделением колпачка вытягивается стеклянная нить, которая под действием сил поверхностного натяжения превращается в каплю. Размер капли, как правило, служит эталоном качества отрезки колпачка.

Чтобы оплавленный край изделия получался более тонким и в месте отделения колпачка не образовывалась капля, на новых машинах для отрезки применяют так называемое стягивание колпачка (рис. 3.40, *б*). Эту операцию проводят при относительно высокой вязкости нагреваемого участка стекла, когда еще не действует сила растяжения, но уже можно, прилагая внешние усилия, уменьшить толщину стенки в месте отреза.

Равномерную толщину стенок изделий при огневой отрезке колпачка обеспечивают прессовыдувные автоматы. Получению равномерной толщины стенок способствует операция предварительного прессования пульки.

Отколка колпачка в холодном состоянии. Процесс отколки колпачка в холодном состоянии основан на использовании физических свойств стекла (теплопроводности, термического расширения). При нагревании узкой полосы стекла можно вызвать локальные внутренние напряжения. В определенный момент эти напряжения превышают предел прочности стекла при растяжении, и часть изделия (колпачок) может быть отделена в месте нагревания. Процесс можно ускорить путем резкого охлаждения зоны после нагревания или надрезания поверхности стекла, в результате чего нарушается его прочность.

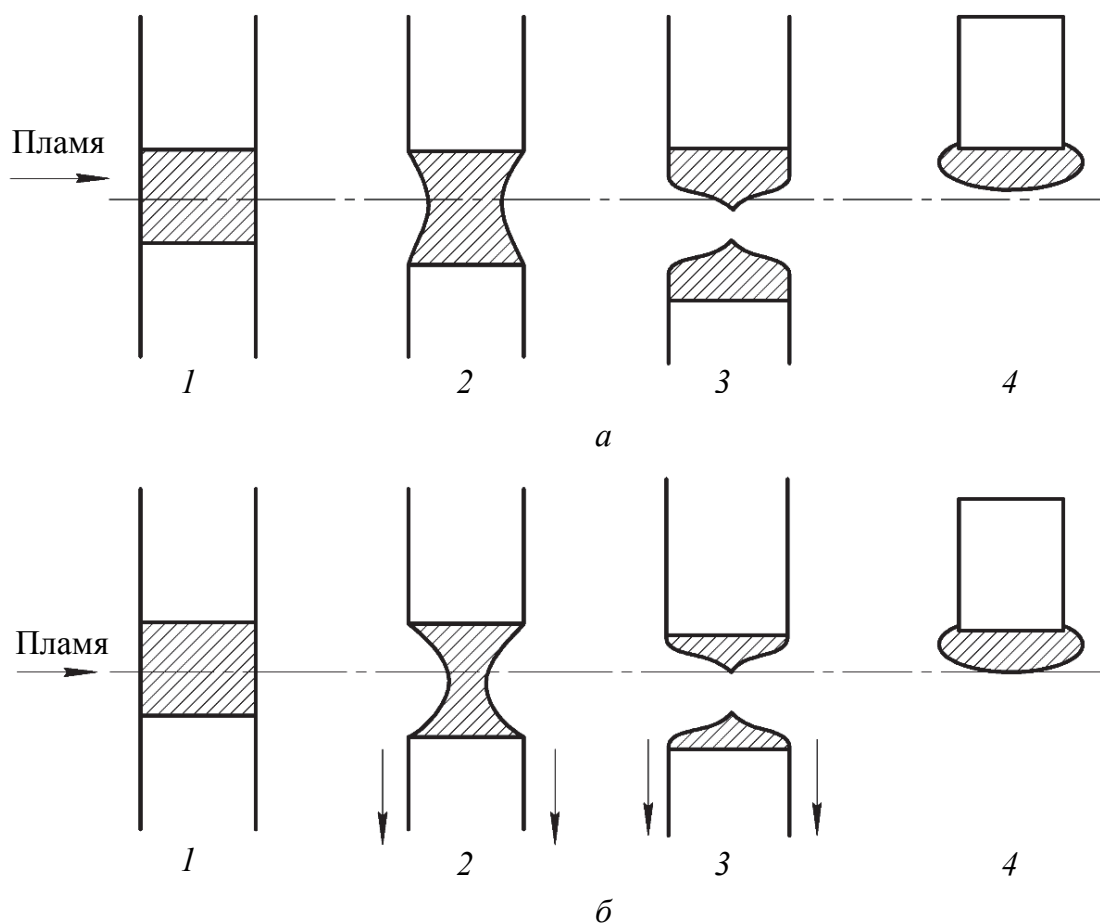


Рис. 3.40. Схемы процесса огневой отрезки колпачка:
а – под действием массы колпачка; *б* – с помощью стягивания

Процесс отколки в холодном состоянии осуществляется различными способами. Обычно стеклянные изделия вращаются в центрирующем или зажимном приспособлении вокруг собственной оси. Стекло в узкой зоне с внешней стороны изделия нагревают горелками и сразу же резко охлаждают. Для создания необходимых внутренних напряжений внутренняя поверхность изделия в месте отделения колпачка должна иметь температуру $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$. Рассмотрим кратко технологию отколки колпачка. Известно, что при нагревании изделия на его наружной поверхности возникают напряжения сжатия, а на внутренней – напряжения растяжения. При охлаждении нагретого изделия наблюдается обратное. Напряжения прямо пропорциональны температурному градиенту по толщине стенки. Если стеклянное изделие, вращающееся вокруг собственной оси, нагревается с одной стороны по узкой круговой зоне, то в его стенке возникает температурный перепад. При резком охлаждении стекла в одном месте этой зоны возникают локальные

напряжения растяжения, превышающие предел прочности стекла при растяжении. В результате образуется трещина, которая распространяется по периметру и вглубь, и часть изделия отделяется по линии нагревания.

При предварительном надрезании поверхности стекла трещина образуется в период нагревания, так как для нарушения поверхности изделия достаточно воздействия окружающего холодного воздуха в то время, когда нагретое место с надрезом вышло из зоны действия горелки.

Отрезные машины могут работать и без предварительного нанесения риски, особенно в массовом производстве стаканов. В этом случае изделия равномерно нагревают острым пламенем по линии отреза (при вращении), а затем в определенных местах отреза прикасаются холодным металлом или абразивом. В результате образуется сквозная трещина и колпачок специальным устройством сбрасывается в лоток для боя. Машины, работающие по указанному принципу, могут быть карусельными и конвейерными. При таком способе колпачка качество края обычно несколько хуже, чем при отколке с предварительным надрезанием.

На многих заводах получили широкое распространение карусельные машины для отрезки колпачков в холодном состоянии. В настоящее время эти машины модернизированы. Качество отколки колпачка в значительной степени зависит от правильной работы отколочной горелки, которая должна давать острое бесцветное пламя и располагаться таким образом, чтобы на поверхности изделия создавалась узкая зона нагрева, препятствующая значительным отклонениям развития трещины от заданной плоскости отколки.

Обработка края и дна изделий. Обработка края изделий после отколки колпачка состоит из следующих операций: шлифования торца края, внешнего (фуговка) и внутреннего (фацетирование) сошлифования кромок и оплавления края. Для тонкостенных изделий массового производства (например, стаканов) оплавление края может следовать за операцией шлифования. Края толстостенных изделий подвергают шлифованию, фуговке, фацетированию и механическому полированию (рис. 3.41, а–г). Оплавление края в этом случае не производится.

Шлифование края. После отрезки колпачка край изделий получается неровным, поэтому его шлифуют. Ручное шлифование толстостенных изделий сложной формы осуществляют на шайбочном станке СШ-2 с чугунной шайбой диаметром 400–800 мм, вращающейся с частотой 350–50 мин⁻¹.

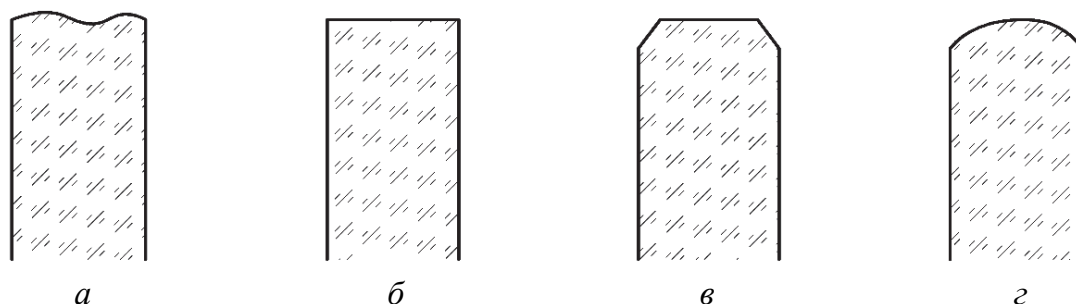


Рис. 3.41. Операции по обработке края

Чугунную шайбу протачивают таким образом, чтобы на ее поверхности оставались кольцевые бороздки от резца. Это необходимо для того, чтобы абразив лучше удерживался на поверхности. По мере сглаживания бороздок шайбу снова протачивают на станке. Края изделия шлифуют мелким песком зернистостью 16–40 или шлифпорошком 63С (КЗ) и ЭИ № 6.

На шайбу непрерывно подается смесь абразивного материала с водой в соотношении 1 : 8. Процесс шлифования осуществляется за счет ручного прижатия обрабатываемого края к шайбе. Края изделий сошлифовывают до заданных размеров.

Аналогично осуществляется грубое шлифование дна изделий и торца пробки для графинов.

Тонкое шлифование (дистировка) края и дна изделий производится на станке СШ-2 с песчаниковыми, карборундовыми или электрокорундовыми шайбами диаметром 400–600 мм, зернистостью 120–180, вращающимися с частотой 450–480 мин⁻¹. Правку, например, песчаниковых шайб проводят два раза в смену наждачным бруском зернистостью 25 с последующей доводкой более мелкозернистым бруском (10, 12).

Фуговку края производят на кольцевой поверхности электрокорундовых и карборундовых кругов диаметром до 400 мм и зернистостью 4–6. Возможно применение алмазных кругов зернистостью 60/40 и 40/28. При фуговке изделие прижимают к шлифовальному кругу или шайбе внешней кромкой края. В некоторых случаях фуговку края можно осуществлять непосредственно после дистировки края на песчаниковой шайбе.

Фацетирование края производится на абразивных кругах небольшого диаметра, имеющих плавный переход от кольцевой к торцевой поверхности. Для фацетирования применяют карборундовые и электрокорундовые круги зернистостью 4–6.

При факетировании изделие прижимают к специально заточенному кругу малого диаметра (факетнику) внутренней кромкой края.

Механическое полирование края и дна изделий осуществляется на станке СШ-2 с пенопластовой или пробковой шайбой диаметром 400–600 мм при подаче на ее поверхность водной суспензии пемзы в соотношении 1 : 2. Частота вращения шайбы – 700 мин⁻¹.

Термическая обработка края выдувных изделий. Термическая обработка края выдувных изделий производится после отколки колпачка и шлифования края.

Цель операции оплавления края изделий – устранение режущих кромок края изделия путем его нагревания до размягчения стекла. При этом под действием сил поверхностного натяжения кромки края округляются. Процесс оплавления края можно разделить на три стадии: предварительный подогрев широкой зоны под верхней кромкой изделия, оплавление края изделия при температуре выше точки размягчения стекла, медленное охлаждение изделия (отжиг).

Оплавление края изделий происходит при высокой температуре под действием поверхностных сил, которые при расплавлении тонкого слоя стремятся сократить поверхность.

Для оплавления края подвод тепла к нему должен быть настолько интенсивным, чтобы он закруглился раньше, чем стенка изделия по всей толщине достигнет температуры деформации. Для поверхностного подогрева стекла следует использовать несветящееся, локально направленное пламя высокой температуры. Вязкость стекломассы, при которой под действием сил поверхностного натяжения кромки края оплавляются быстро, составляет 10⁴ Па·с, что соответствует температуре около 1000°C.

В настоящее время применяют различные способы размещения оплавочных горелок (рис. 3.42).

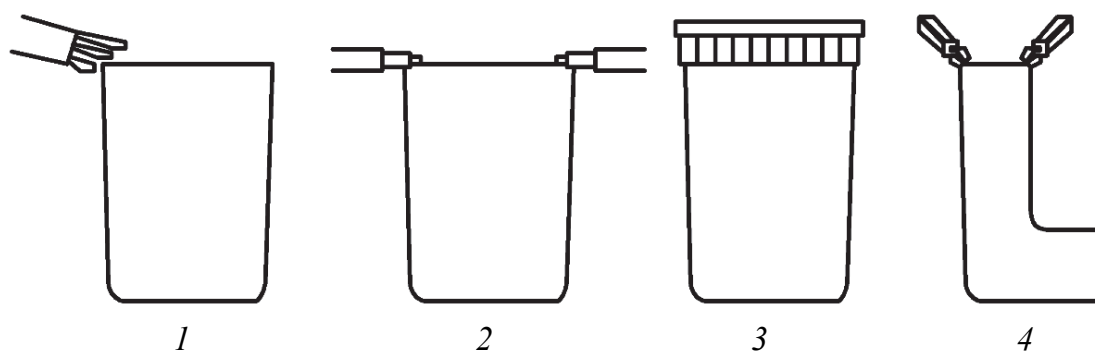


Рис. 3.42. Способы размещения горелок при оплавлении края

По способам 1 а 2 края оплавливают тогда, когда изделие непрерывно перемещается в направлении, противоположном воздействию пламени, по способам 3 и 4 – при вращении изделия вокруг собственной оси, но без непрерывности его поступательного движения.

При оплавлении края длиннофакельной горелкой по способу 1 трудно создать условия правильного теплообмена, поэтому наблюдается значительное количество боя изделий. Наиболее совершенным для оплавления края тонкостенных изделий является способ 3. При этом способе горячие газы поступают сверху и быстро нагревают верхнюю кромку края, обеспечивая в то же время плавное изменение температуры в вертикальном направлении от верхней кромки изделия. В результате практически исключается появление узкой локальной зоны критических напряжений. Наиболее распространены в промышленности круговые или овальные машины с одной длиннофакельной горелкой, находящейся с одной стороны туннеля, или с системой горелок, расположенных вдоль рабочей зоны карусельной машины. Изделия устанавливают на круговые подставки, которые вращаются вокруг оси и одновременно перемещаются по периметру карусели.

В последнее время для оплавления края изделий используют короткофакельные горелки, устанавливаемые близко к изделиям под углом 45–60° к их вертикальной оси. Набор таких горелок вдоль пути перемещения изделий позволяет создать оптимальный режим оплавления, сводящий бой изделий на этой операции к минимуму.

3.8.2. Вторичная обработка

Декоративная обработка стеклоизделий с применением абразивных материалов и инструментов. Большинство изделий сортовой посуды обрабатывается связанными абразивными материалами (шлифовальными кругами), применяются также и свободные абразивы (песок, наждак, пемза, полирит и т. п.).

При шлифовании стекла происходят два параллельных процесса: при первом (подготовительном) разрушается на некоторую глубину поверхность стекла и образуется система трещин; при втором (производительном) из верхнего трещиноватого слоя извлекаются осколки. В результате появляется множество выколов, образующих зону разрушения 2 (рис. 3.43). Под верхним слоем расположен слой, также затронутый шлифованием, но с более слабыми признаками разрушения. Он образован трещинами, идущими глубже трещиноватого слоя,

и является зоной предразрушения 3, где абразив «проводит» подготовительную работу. Если обработка происходит с применением жидкости *I*, смачивающей стекло (воды), то она проникает в образовавшиеся трещины, не дает им срастаться и последующий процесс разрушения активизируется.

Сущность процесса механического полирования заключается в образовании и удалении кремнекислородной пленки, появляющейся на поверхности стекла под действием воды. При полировании мягкий полировальный материал с закрепившимися на нем зернами полирующего порошка снимает при своем движении защитную пленку с выступов шлифованной поверхности стекла. После этого обнажившаяся поверхность стекла взаимодействует с водой, образуется новый слой пленки, который снова снимается полировальником. Такое чередование процессов происходит до максимального сглаживания выступов (выравнивания поверхности).

Для получения на изделиях шлифованных рисунков используют шлифовальные круги на основе карбида кремния (карборунда), электрокорунда и синтетического алмаза. В шлифовальных кругах применяют две основные группы связок: неорганические (керамическая К, металлическая М) и органические (бакелитовая Б, вулканитовая В).

В процессе работы связка не должна стачиваться слишком быстро, так как в этом случае абразивные зерна выкрашивались бы совсем не затупившимися. В то же время связка должна истираться настолько, чтобы затупившиеся зерна выкрашивались, своевременно открывая свежие режущие зерна абразива. Скорость истирания связки обуславливает твердость круга: если связка истирается медленно, то круг называют твердым, если быстро – то мягким.

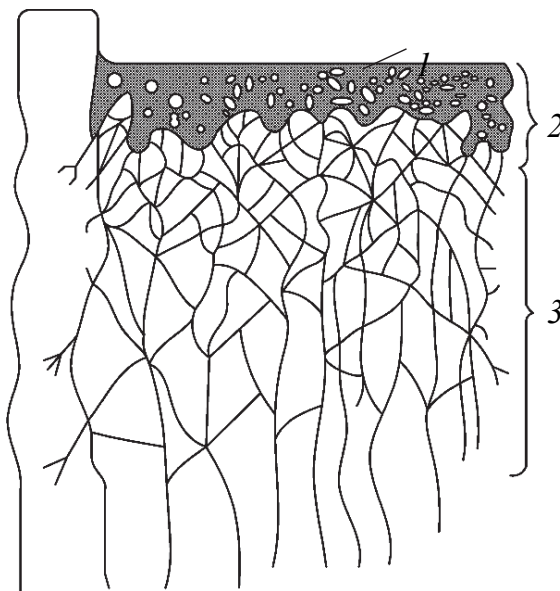


Рис. 3.43. Схема строения разрушенного слоя стекла:
I – жидкость;
2 – зона разрушения;
3 – зона предразрушения

Виды декоративной обработки. Рисунки валового и номерного шлифования относятся к простейшим видам, выполняемым на стеклоизделиях из натрий-кальций-силикатного бесцветного и цветного стекла. Рисунки обычно не полируют, они остаются на изделии матовыми. Для нанесения рисунков используют мелкозернистые электрокорундовые круги с широким закругленным или овальным ободом, а также с двусторонним коническим профилем. При нанесении рисунков на изделия массового ассортимента снимают небольшой слой стекла.

Нанесение широкоплоскостной грани – это способ украшения поверхностей ваз, графинов, пепельниц и других толстостенных изделий шлифованными и полированными плоскостями. Для лучших образцов граненого стекла характерна геометрическая точность нанесения плоскостей. Для гранения особенно подходят свинцовые хрустали, у которых высокие показатели преломления и дисперсии. Гранят также изделия из цветного и, особенно, из накладного стекла. Нередко гранят отдельные элементы стеклоизделий: ножки и донышки рюмок, бокалов, фужеров и т. п.

Гранение изделий обычно производится в три стадии: грубое шлифование (обдирка), тонкое шлифование (дистировка), полирование.

При обработке больших толстостенных изделий все операции осуществляют на шайбочных станках: грубое шлифование – на чугунной шайбе с песком, тонкое шлифование – на песчаниковой шайбе, полирование – на деревянной или пробковой шайбе с применением войлочных накладок. В последнее время для полирования применяют шайбы из эластичного полихлорвинила.

Алмазную резьбу на стеклоизделиях выполняют шлифовальными кругами с острым режущим профилем. Благодаря отражению и преломлению света на полированных поверхностях прорезанных в стекле граней возникает яркая игра света. По аналогии с игрой света в бриллианте (граненом алмазе) эта резьба и получила название «алмазной». Кроме того, очертания некоторых элементов резного рисунка напоминают граненые драгоценные камни.

Эффект алмазной резьбы прежде всего зависит от оптических свойств стекла, а также от формы изделия и толщины его стенок. При выполнении алмазной резьбы на стекле должны получаться так называемые призмы полного внутреннего отражения. Поэтому угол режущего профиля кругов должен быть равен или немного больше 90° (в зависимости от диаметра изделия и глубины прорезанной грани).

Введение в состав стекла оксидов, увеличивающих показатели преломления и дисперсии, в особенности PbO , усиливает световые эффекты резного стекла. Высокий показатель преломления калий-свинцово-силикатного стекла обеспечивает эффектную световую игру и при больших углах режущего профиля круга, поэтому на хрустальных изделиях рисунки алмазной резьбы могут быть более разнообразными.

При выполнении алмазной резьбы на изделиях из простого стекла угол режущего профиля круга не должен превышать 100° , а на изделиях из свинцового хрусталя – 120° .

Угол режущего профиля связан с размерами изделий, глубиной грани, показателем преломления стекла. Имея эти данные, можно рассчитать угол режущего профиля абразивного круга по формулам:

$$\sin \beta = \frac{2d}{\sqrt{2(d-2h)^2 + 4h^2}}; l = \frac{2dh}{\sqrt{(d+2h)^2 + 4h^2}};$$
$$\beta = 2\arcsin l / n, \quad (3.3)$$

где d – внешний диаметр изделия; h и l – глубина и ширина алмазной грани; n – показатель преломления стекла.

После предварительной обработки края изделия поступают на разметку, которая заключается в нанесении на поверхность изделий основных контуров будущего рисунка.

Размеченные изделия конвейером подаются на обработку. Грани наносят вручную: изделие прижимают к режущей кромке алмазного круга и плавно передвигают его по контуру рисунка. При нанесении элементов рисунка рабочий придает изделию различные положения относительно алмазного круга.

Для охлаждения применяют воду или смазочно-охлаждающую жидкость (СОЖ) на водной основе, которые подают на круг. Вода и СОЖ предотвращают нагревание круга и изделия при обработке, удаляют частицы со шлифованного стекла и способствуют процессу разрушения стекла с помощью режущей кромки круга. Расход воды и СОЖ при обработке мелких изделий составляет примерно 60 л/ч, крупных изделий – 120 л/ч.

В процессе работы алмазный инструмент изнашивается, причем наибольший износ претерпевает режущая кромка круга. При износе круга сверх допустимого, а также при затуплении и засаливании режущей поверхности необходима его правка.

Если при нанесении рисунка алмазной резкой рабочий прижимает изделие к кругу таким образом, чтобы через изделие был виден процесс обработки, а изделие касается режущей кромки в передней части круга, то это метод обработки «сверху». При обработке изделий из цветного стекла или с накладом применяют метод обработки «снизу»: изделие соприкасается с нижней частью круга и работающий может наблюдать за ходом обработки, так как она происходит на непосредственно обращенной к нему поверхности изделия.

При нанесении на изделия рисунков валового и номерного шлифования применяются станки с гидродинамическими подшипниками типа САГ двух моделей: САГ-3 для обработки крупных и средних стеклоизделий и САГ-4 для обработки средних и мелких стеклоизделий.

Пескоструйное декорирование основано на том, что зерна кварцевого песка, с силой ударяясь о поверхность стекла, оставляют на ней выколки и царапины. В результате стекло становится матовым и поток падающего или проходящего света рассеивается.

Декорирование художественных изделий осуществляется на специальной установке струей песка, подаваемой на изделия с помощью сжатого воздуха (рис. 3.44).

Очищенный воздух, подаваемый по магистрали 1, захватывает песок из бункера 2. Песчано-воздушная смесь по шлангу через сопла 3 направляются на обрабатываемое изделие 6, установленное в камере 5 на вращающейся подставке 7. Для отсоса пыли служит вентилятор 4, а для сбора отработанного песка – бункер 8. В этом случае необходимо применять трафареты, которые защищают участки поверхности изделия, не подлежащие обработке. Трафареты изготавливают из мягких металлов, каучука, резины, пластмасс, клеевых мастик, проклеенной бумаги.

Химическая обработка стеклоизделий. Химическая обработка сортовых изделий основана на разрушении стекла плавиковой кислотой.

Существуют следующие виды химической обработки изделий сортовой посуды: химическое полирование рисунков алмазной резки, матирование поверхности стекла, декоративное травление.

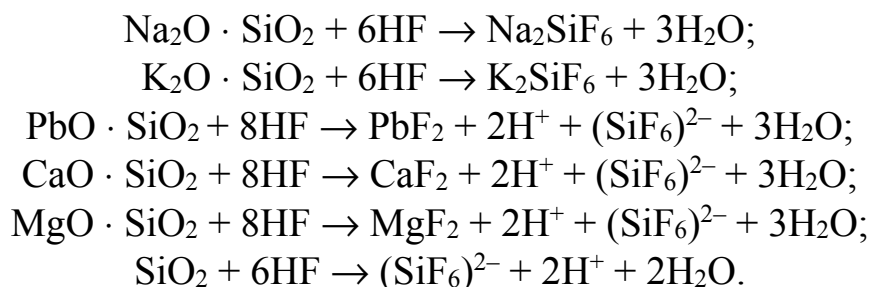
Химическое полирование применяется главным образом для полирования элементов алмазной резки на изделиях из свинцового хрусталя. Для каждого химического состава стекла устанавливают свои режимы полирования.

Полирование осуществляется в смеси плавиковой HF и серной H₂SO₄ кислот (система HF – H₂SO₄ – H₂O – стекло). Главной частью смеси является плавиковая кислота, которая, вступая в реакцию со стеклом, образует газообразный фторид кремния, а также фториды и кремнефториды металлов. Эти реакции приводят к растворению стекла, сглаживанию шероховатостей на шлифованной поверхности.

Образующиеся фториды и кремнефториды в основном малорастворимы и очень быстро покрывают поверхность стекла плотным слоем. Вводимая в полирующую смесь серная кислота взаимодействует со фторидами и кремнефторидами, превращая их в легкосмываемые сернокислые соли. Технологическая схема химического полирования сортовых изделий приведена на рис. 3.45.

Комплекс химических реакций, происходящих при полировании, можно разбить на два этапа.

Первый этап. Реакции воздействия избытка плавиковой кислоты на стекло:



Второй этап. Реакции, протекающие под действием серной кислоты, в зависимости от условий полирования:

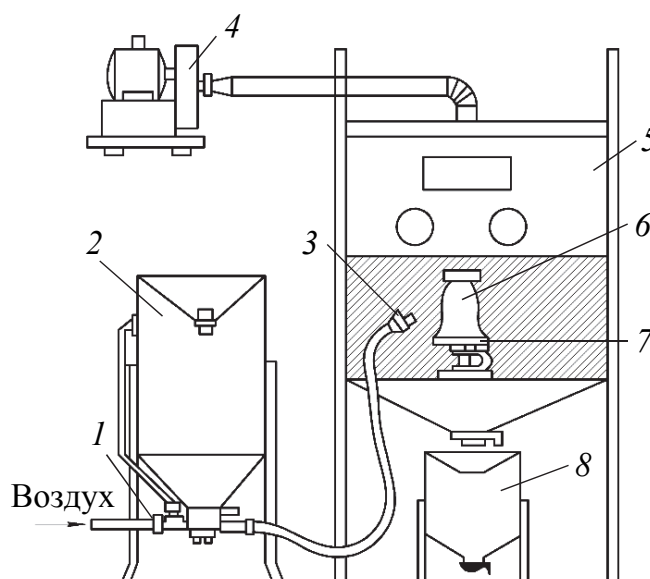
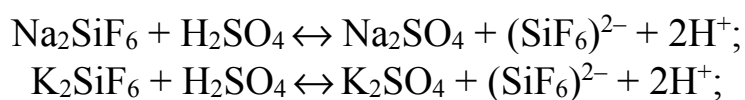
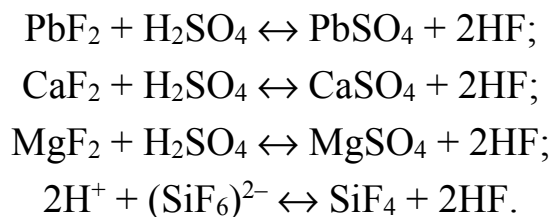


Рис. 3.44. Нагнетательная установка для пескоструйного декорирования:

- 1 – магистраль; 2 – бункер;
3 – сопла; 4 – вентилятор; 5 – камера;
6 – обрабатываемое изделие;
7 – вращающаяся подставка;
8 – бункер

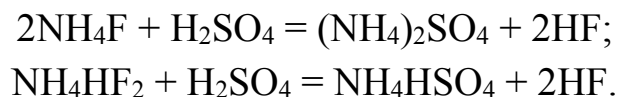


На первом этапе равновесие в полирующем растворе смещено полностью в сторону образования продуктов реакции, в то время как на втором этапе реакции обратимы и смещение равновесия зависит от концентрации серной кислоты, степени разбавления раствора, содержания воды и температуры.



Рис. 3.45. Технологическая схема химического полирования сортовых изделий

Химическое полирование можно осуществлять солями плавиковой кислоты, в частности фторидом-бифторидом аммония $\text{NH}_4\text{F} \cdot \text{NH}_4\text{HF}_2$. В результате взаимодействия $\text{NH}_4\text{F} \cdot \text{NH}_4\text{HF}_2$ с серной кислотой в полирующем растворе образуется плавиковая кислота:



Для приготовления полирующих смесей используют 40%-ную или 70%-ную плавиковую кислоту (плотность 1110–1140 кг/м³) и 92–96%-ную серную кислоту (плотность примерно 1840 кг/м³).

На заводах сортовой посуды применяют полирующие смеси, содержащие 1,3–12,0% HF и 50–65% H₂SO₄ и имеющие температуру 50–70°C. После полирования изделия ополаскивают в воде ($t = 50\text{--}70^\circ\text{C}$) или 55–65%-ной H₂SO₄ с окончательным ополаскиванием в воде.

Соли, образующиеся в результате химических реакций, быстрее отлагаются в углублениях шлифованной поверхности, чем на ее выступах. В то же время газообразные продукты ускоряют их растворение. В результате действия этих факторов происходит выравнивание шлифованной поверхности.

Вследствие образования защитного слоя солей скорость полирования замедляется, поэтому для химического полирования характерны или кратковременные многократные погружения изделий в полирующую смесь с последующей промывкой, или однократный более длительный ее контакт с изделиями при интенсивном перемешивании смеси. В соответствии с этими технологическими схемами в отечественной промышленности получили распространение следующие способы химического полирования:

- многоциклового с промывкой изделий в воде и сернокислотном растворе;
- одноциклового с промывкой изделий в воде.

При многоцикловом способе полирования число циклов погружения в полирующую смесь и промывания зависит от размера и формы изделия, глубины граней рисунка, температуры и концентрации кислот в смеси.

Декоративные покрытия на стеклоизделиях. *Оксидно-металлические цветные покрытия.* Такие покрытия получают при обработке изделий после формования растворами солей разных металлов. Для данного способа декорирования подбирают соли, легкорастворимые в воде или в некоторых нетоксичных неорганических и органических растворителях. На горячей поверхности стекла соли разлагаются и образуют тонкие пленки металлов, оксидов металлов или смеси металлов с оксидами. За счет этого поверхность стекла окрашивается в различные цвета.

Покрытия наносят на горячее стекло (температура около 600°C) после выработки (выдувания и прессования полых изделий,

вытягивания или прокатки листового стекла) пистолетами-распылителями. Окончательно покрытие на стекле закрепляют в процессе отжига.

Фиолетовые и синие оттенки получают нанесением на изделия растворов хлоридов олова (IV) и сурьмы (III): 10–100 г реактива на 100 мл растворителя. Зеленые и оливковые оттенки дают соли хрома и кобальта, например $\text{Cr}(\text{OCl})_2$, $\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2 - 4\text{H}_2\text{O}$. Наиболее устойчивую окраску дают хлориды железа – $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Для получения желтых и оранжевых цветов необходимо взять 10–40 г $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ на 100 мл растворителя. В качестве растворителей обычно применяют воду и спирт, при образовании осадка добавляют HCl .

Оксидно-металлические покрытия на стекле можно получить возгонкой твердых солей, в результате чего на поверхности образуется тонкая радужная пленка. Этот способ обработки называется иризацией (от *iris* – радуга). Для получения иризирующего эффекта стекло должно иметь температуру, близкую к температуре размягчения. Реже применяют низкотемпературную иризацию (около 220°C).

Для иризации изделий чаще всего используют легковозгоняющиеся соли олова, висмута, титана, бария, стронция, которые при нагревании превращаются в пар без плавления. На поверхности стекла происходит сублимация, т. е. осаждение твердого вещества из пара. Соли, как правило, разлагаются с образованием тонкой оксидно-металлической пленки, отливающей всеми цветами радуги.

Эффект иризации обусловлен интерференцией света. Интерферируют лучи света, отражающиеся от обеих поверхностей пленки. Луч белого света, как известно, состоит из нескольких цветных лучей с различными длинами волн. При определенных условиях цветные волны лучей, отражающихся от обеих поверхностей, складываются: одни цветные волны усиливаются, а другие ослабляются. В зависимости от этого в отраженных лучах будет преобладать какой-либо цветовой оттенок.

Наибольшей способностью давать иризирующие пленки обладает хлорид олова (II). Для получения различных оттенков к нему добавляют и другие соли.

Применяют следующие способы иризации: гутный – обработка изделий после изготовления, вакуумный – обработка стеклоизделий в вакууме. При вакуумном способе, в основном применяемом для декорирования стеклянной бижутерии, елочных украшений, обычно возгоняются или испаряются металлы и оксиды металлов.

Покрyтия золотом и люстровыми красками. Украшение золотом значительно повышает художественную ценность изделий, позволяет в сочетании с другими видами обработки создавать красивую и недорогую посуду. После нанесения 12%-ного препарата жидкого золота на стекло и обжига образуется тончайшая пленка металлического золота, прочно соединенная со стеклом. Препарат жидкого золота на изделия можно наносить вручную и на машинах.

Вручную препарат жидкого золота на изделия наносят на вращающихся турникетках, закрепленных на рабочих столах, расположенных по обеим сторонам движущейся ленты конвейера. Каждое изделие центрируется мастером на турникетке.

Чтобы пленка золота хорошо закрепилась на поверхности, изделия необходимо обжигать при температуре, близкой к температуре размягчения стекла. Большинство изделий, декорированных золотом, обжигают в туннельных муфельных печах с электрическими нагревателями.

Люстровые краски представляют собой растворы смолянокислых солей тяжелых металлов в органических растворителях. После нанесения их на стекло и обжига образуется тончайшая цветная пленка оксидов указанных металлов. Она отливает металлическим блеском в отраженном свете.

Покрyтия и рисунки силикатными красками. Силикатные краски представляют собой тонкомолотые легкоплавкие цветные стекла. Температура растекания их при обжиге на изделиях составляет около 550°C, что соответствует температуре начала размягчения стекла. При обжиге расписанного изделия силикатные краски приплавляются к поверхности стекла, образуя прозрачные или непрозрачные цветные покрытия. Соответственно различают прозрачные и непрозрачные силикатные краски. Последние обычно называют эмалями. Полупрозрачные краски занимают промежуточное положение.

Краски для стекла состоят из флюса и красителя. Если материалы, образующие флюс, были сплавлены вместе с красителями, то получается прозрачная краска, так как краситель растворяется в бесцветном стекле. Когда бесцветный флюс плавят отдельно, а потом размалывают вместе с пигментом, получают эмали. В качестве пигментов служат окрашивающие оксиды или прокаленные при высокой температуре смеси окрашивающих оксидов с неокрашивающими, которые обеспечивают стабильность окраски.

Характер растекания краски по стеклу главным образом определяется свойствами флюса: флюс не должен быть сильно текучим, так как тогда краска при обжиге будет стекать с вертикальных стенок изделий, он также не должен разрушаться при температуре обжига. В качестве флюса может служить боросиликат свинца $2\text{PbO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, имеющий состав, мас. %: SiO_2 – 10,42; B_2O_3 – 12,11; PbO – 77,47.

Когда химическая устойчивость флюса, приготовленного на основе боросиликата свинца, недостаточна, добавляют другие оксиды. Химически устойчивые флюсы имеют следующий состав, %: PbO – 40–67; SiO_2 – 7–35; B_2O_3 – 3–17; CaO – 0–6; ZnO – 0–5; Al_2O_3 – 0–8; TiO_2 – 0–10; Na_2O – 0–5; K_2O – 0,3–5,0.

Для получения эмалей предварительно сплавленный флюс размалывают в шаровой мельнице вместе с пигментом. После размола в шаровых мельницах краски обезвоживают на центрифуге, сушат в сушильном шкафу до постоянной массы и расфасовывают в пакеты, на которых должны быть обозначены их технические характеристики. Краски должны быть просеяны сквозь сито, имеющее 10 000 отв./см², их остаточная влажность после 3 ч сушки при температуре 105°C не должна превышать 1,5%.

Цвет обезвоженной краски проверяют колориметром, а блеск – фотометром.

Желательно, чтобы температура, при которой происходит растекание красок, была на 10–20°C ниже температуры размягчения стекла. Температурные коэффициенты линейного расширения обожженной краски и стекла могут отклоняться не более чем на 5%. При большем отклонении на поверхности появляются волосяные трещинки (цек) или слой краски отделяется от стекла в результате сильных механических напряжений между ними. Температурные коэффициенты линейного расширения краски и стекла можно считать заранее.

Аэрографией называется нанесение краски на изделия через трафареты с помощью сжатого воздуха. Аэрограф распыляет краску под давлением воздуха 0,2–0,5 МПа. Для ручных работ обычно используют пистолет-распылитель. Способ аэрографии очень удобен при сплошном окрашивании красками и эмалями прессованных и закаленных изделий. Более сложные рисунки, в том числе и многоцветные, наносят при последовательной смене трафаретов, которые изготавливают из плотной бумаги, пластмассы или металлической фольги. Трафарет должен соответствовать

форме изделия и плотно прилегать к его поверхности. Рабочее место при нанесении рисунков аэрографией должно оборудоваться вытяжной вентиляцией.

При печати на стекле применяют сетчатые трафареты, через которые краску пастообразной консистенции продавливают на изделия. Данный способ обычно служит для декорирования массовой продукции одно- и многоцветными (до 4–5 цветов) рисунками. Для печати каждого цвета готовят отдельный трафарет. Сетчатый трафарет высокого качества выдерживает 30 000 отпечатков.

Для изготовления трафаретов используют сетки из искусственных волокон (капрона, нейлона) и металлические, имеющие 4 000–16 000 отв./см². Чем мельче сетка, тем лучше качество получаемого рисунка. Трафарет получают фотографическим способом с использованием фоточувствительного покрытия.

Основой технологии декорирования изделий трафаретной печатью является то, что краска должна протекать сквозь трафарет под давлением специального приспособления – ракеля. При декорировании изделий горизонтально расположенный сетчатый трафарет плотно прижимают к находящемуся под ним стеклянному изделию с помощью ракеля. Если изделие имеет цилиндрическую конфигурацию, то оно вращается вокруг оси, параллельной плоскости сетчатого трафарета. Конические изделия вращаются вокруг горизонтальной оси, а сам трафарет поворачивается относительно конической поверхности изделия.

При многоцветной печати можно менять трафареты на одной печатающей установке или же пользоваться несколькими установками, после чего предварительно печатать различные цвета. Декалькомания – это способ печатания рисунков на клеевой бумаге и перенесения их на стеклянные изделия. Рисунки печатают красками или эмалями. Собственно деколями называют многокрасочные отпечатки, выполненные на бумаге, имеющей клеевой слой. При смачивании деколей водой клеевой слой растворяется, а пленка с рисунком отделяется от бумажной основы и переводится на стекло.

Известны два вида деколей: простые и сдвижные. Изображение на простой деколи зеркально, краски печатают в обратной последовательности: сначала контур изображения, а затем фон. Сдвижная деколь отличается правильной последовательностью печати красок.

Способ фотопечати на стекле основан на применении светочувствительной эмульсии хромированного декстрина, способной терять свою клейкость на свету пропорционально силе света. Стеклянная пластинка, покрытая тонким слоем светочувствительного раствора и после высушивания засвечиваемая дневным или искусственным светом под диапозитивом, теряет свою клейкость в освещенных местах. Неосвещенные части остаются клейкими.

Засвеченную пластинку запудривают силикатной краской, частицы которой задерживаются в липких местах в количестве, пропорциональном силе засвечивания.

Краску с изображением закрепляют слоем коллодия, затем пленку надрезают, отделяют и переносят на изделие. Изделие с перенесенной пленкой промывают 1%-ным раствором NaOH или KOH, а затем водой и сушат при комнатной температуре. Высушенные изделия с нанесенной пленкой дополнительно оформляет художник, затем их обжигают в муфельной печи при температуре 560–580°C. Обожженные изделия должны иметь хорошо оплавленную окраску, без искажений рисунка и каких-либо пороков.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Составы древних стекол (по Б. Нейману)

Место находки (время получения)	Цвет, назначение	Содержание оксидов, мас. %											
		SiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	SnO ₂	MnO	CuO	Σ
Египет, Горуб Мединед (около 1500 г. до н. э.)	Фиолетовый, почти прозрачный с серо-голубыми и желтыми полосками	62,9	8,87	5,49	12,83	1,86	2,58	1,29	1,51	0,42	1,71	0,46	99,92
Египет, Фивы (около 1500 г. до н. э.)	Непрозрачный темно-синий	67,82	4,03	2,30	13,71	2,31	4,38	1,08	0,98	–	1,12	1,96	99,72
Египет, Тэль-Эль-Амарна (около 1400 г. до н. э.)	Непрозрачный зеленый	62,44	9,23	3,05	18,08	2,76	1,00	0,84	0,72	0,47 (PbO)	–	2,00	–
Ассирия-Вавилон, Ниппур (1400 г. до н. э.)	Бирюзовый непрозрачный (искусственный камень бирюза)	64,41	6,19	5,59	13,98	2,37	1,52	1,36	1,28	0,32	–	2,60	99,62
Ассирия, Нимруд (700–630 г. до н. э.) по В. Э. Тернеру	Фрагмент чаши бледно-зеленого цвета	67,92	8,20	4,34	14,72	1,89	+TiO ₂ 1,79	0,49	0,75	P ₂ O ₅ 0,30	не опр.	–	–
Месопотамия, Самарра (IX в н. э.), по Б. Нейману	Бесцветная мисочка	67,22	5,84	5,64	13,28	2,68	1,80	FeO 1,03	0,39	PbO 0,82	1,07	–	99,77
	Белый сосуд	67,44	4,80	5,64	13,94	1,93	2,98	FeO 0,51	0,84	PbO 1,01	0,73	–	99,82
Древняя Индия, г. Коппа (V в до н. э.) по П. Рой и И. Варшней	Зеленая бусина с черным и коралловым красным украшением на поверхности	67,13	3,03	1,60	19,61 (по разности)	–	6,70	1,50	–	TiO ₂ 0,40	0,032	–	–

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Составы древнеримских стекол (по Б. Нейману и В. Гельману)

Место находки (время получения)	Цвет, назначение	Содержание оксидов, мас. %											
		SiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	SnO ₂	MnO	CuO	Σ
Район Майнца, I в н. э.	Синий аквамарин- вый (прозрачное стекло)	69,22	7,51	1,22	11,99	2,16	7,12	0,49	–	–	–	–	–
Из Салоны, II в н. э.	Печеночно-красный (непрозрачный), мо- заичное стекло	59,28	8,45	1,36	16,18	1,53	5,99	1,89 FeO	0,37	0,61 PbO	1,32	2,83 Cu ₂ O	99,79
Из Кельна, I–V вв. н. э.	Бесцветное	68,92	5,79	0,43	20,67	0,77	2,49	0,91	–	–	–	–	–
Из Закхова (Сакрау) около Вроцлава, IV в н. э.	Темно-зеленая про- зрачная чаша с желтыми полосками «миллефиори»	66,84	4,38	2,07	16,35	1,41	3,24	1,68	0,71	–	0,57	3,23	100,55
Из Кельна III–IV в н. э.	Желто-зеленая чаша	69,05	7,86	0,15	19,62	0,87	0,77	0,75	0,52	–	0,16	0,11	–
Из Альцей	Бесцветное посудное	69,93	6,13	0,93	19,87	0,94	0,94	0,33	0,45	–	0,20	–	–
Петтенкофер	Печеночно-красное	49,90	7,20	0,87	11,03	11,54	1,20	2,10	–	–	–	15,51 Cu ₂ O	–
Рутенберг-Бенрат	Молочно-белое	71,49	7,63	следы	14,05	1,33	2,40	1,04	1,74 Sb ₂ O ₃	0,08 PbO	0,24	–	–

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица 1
Составы древнерусских посудных стекол XI–XIII вв., найденных в Киеве, Вышгороде или Белой Веже
(аналитики А. П. Куранова, Э. П. Бильтюкова, Н. Лихницкая)

Цвет	Содержание оксидов, мас. %										
	SiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MnO	CuO	П. п. п.
Почти бесцветный	70,52	7,65	2,95	12,98	2,48	2,25	0,55	0,65	–	–	0,25
Зеленый	67,72	7,78	3,65	13,68	3,28	2,30	1,05	0,47	–	–	–
Светло-желтый	68,59	4,75	1,70	15,95	4,88	2,16	0,80	0,13	–	0,54	–
Коричневого-зеленый	65,47	6,13	1,30	13,94	2,34	1,98	0,39	0,19	8,62	–	–
Светло-зеленый	58,05	18,57	3,33	0,20	13,35	0,77	0,55	0,33	0,74	4,41 P ₂ O ₅	–

Таблица 2
Составы древнерусских свинецсодержащих посудных стекол XI–XIII вв., найденных в Киеве или Вышгороде
(аналитики А. П. Куранова, А. С. Запорожец)

Цвет	Содержание оксидов, мас. %										
	SiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	PbO	CuO	П. п. п.
Светло-желтый	55,40	1,42	0,11	1,70	15,71	2,47	0,09	0,53	22,45	–	–
Светло-желтоватый	58,85	0,83	0,62	–	10,00	1,51	0,22	0,70	26,72	–	1,31
Светло-зеленый	56,02	1,52	0,25	1,46	14,41	0,82	0,07	0,32	25,16	–	–
Почти бесцветный	57,97	2,30	0,77	0,82	13,36	1,88	0,12	0,70	21,93	–	–
Темно-зеленый	30,80	1,08	0,07	0,94	1,58	0,41	0,07	–	63,82	0,60	0,38



ЛИТЕРАТУРА

1. Минько, Н. И. История развития и основы технологии стекла: учеб. пособие / Н. И. Минько, В. М. Нарцев, Р. Г. Мелконян. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. – 396 с.

2. Качалов, Н. Стекло / Н. Качалов. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 463 с.

3. Безбородов, М. А. Химия и технология древних и средневековых стекол / М. А. Безбородов. – Минск: Наука и техника, 1969. – 276 с.

4. Безбородов, М. А. Стеклоделие Древней Руси / М. А. Безбородов. – Минск: Изд-во АН СССР, 1956. – 306 с.

5. Стекло Восточной Европы с древности до начала XX века. – СПб.: Нестор-История, 2015. – 400 с.

6. Беларускае мастацкае шкло / скл. А. Сурскі. – Мінск: Беларусь, 1978. – 83 с.

7. Терещенко, И. М. Технология листового стекла: учеб. пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности «Химическая технология неорганических веществ, материалов и изделий» / И. М. Терещенко. – Минск: БГТУ, 2010. – 360 с.

8. Терещенко, И. М. Технология производства стеклянной тары: учеб. пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности «Химическая технология неорганических веществ, материалов и изделий» / И. М. Терещенко, А. П. Кравчук. – Минск: БГТУ, 2014. – 358 с.

9. Коцик, И. Окрашивание стекла / И. Коцик, И. Небреженский, И. Фандерлик. – М.: Стройиздат, 1983. – 210 с.

10. Гулоян, Ю. А. Технология стекла и стеклоизделий / Ю. А. Гулоян. – М.: Высшая школа, 2003. – 480 с.

11. Гулоян, Ю. А. Технология стеклотары и сортовой посуды / Ю. А. Гулоян. – М.: Легпромбытиздат, 1986. – 263 с.

12. Волгина, Ю. М. Теплотехническое оборудование стекольных заводов / Ю. М. Волгина. – М.: Стройиздат, 1984. – 306 с.

13. Панкова, Н. А. Теория и практика промышленного стекловарения: учеб. пособие / Н. А. Панкова, М. Ю. Михайленко. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2000. – 102 с.

14. Наилучшие доступные технологии. Производство стекла. Аспекты повышения энергетической эффективности: ГОСТ Р 56828.28-2017. – Введ. 12.01.2017. – Минск, 2020. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200146499>. – Дата доступа 15.04.2020.

15. Станек, Я. Электрическая варка стекла / Я. Станек; под ред. Ю. А. Гулюяна. – М.: Легкая индустрия, 1979. – 248 с.

16. Варка свинецсодержащих стекол в электрических печах с электродами на основе двуокиси олова / Л. Х. Беккер [и др.] // Стекло и керамика. – 1976. – № 2. – С. 11–12.

17. Боргман, В. А. Радиационное окрашивание хрусталя / В. А. Боргман, Н. Л. Каминская // Стекло и керамика. – 1984. – № 2. – С. 12.

18. Воздействие расплавов свинцовых стекол на электроды из диоксида олова / А. А. Верлоцкий [и др.] // Стекло и керамика. – 1987. – № 2. – С. 17.

19. Феколин, В. Н. Гомогенизация стекломассы в электрических печах / В. Н. Феколин, В. А. Колесов, Л. Н. Шлыков // Стекло и керамика. – 1987. – № 10. – С. 10.

20. Шaeффер, Н. А. Технология стекла / Н. А. Шaeффер, К. Х. Хойзнер. – Кишинев: STI-Print, 1998. – 280 с.

21. Терещенко, И. М. Оборудование стекольных производств: учеб.-метод. пособие / И. М. Терещенко. – Минск: БГТУ, 2011. – 112 с.



ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. ИСТОРИЯ СОРТОВОГО СТЕКЛА	5
Глава 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЗРАЧНОСТИ И ЦВЕТНОСТИ СТЕКОЛ	20
Глава 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ СОРТОВОГО СТЕКЛА	37
3.1. Общая технологическая схема производства сортовых изделий	38
3.2. Типы и характеристика сортовых стекол.....	40
3.3. Сырьевые материалы в производстве сортового стекла	46
3.4. Подготовка сырьевых материалов и шихты	53
3.5. Основы стекловарения, конструкция и характеристика печных агрегатов для производства сортовых изделий.....	66
3.6. Выработка сортовых изделий.....	101
3.6.1. Ручная выработка выдувных изделий	101
3.6.2. Автоматизированная выработка	111
3.7. Отжиг сортовых изделий	117
3.7.1. Температурный режим отжига	119
3.7.2. Печи для отжига сортовых изделий (леры)	121
3.8. Обработка сортовых изделий	125
3.8.1. Термические процессы первичной обработки	125
3.8.2. Вторичная обработка	132
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	145
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	146
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	147
ЛИТЕРАТУРА	148

Учебное издание

Терещенко Игорь Михайлович
Кравчук Александр Петрович
Павлюкевич Юрий Геннадьевич

ТЕХНОЛОГИЯ СОРТОВОГО СТЕКЛА

Учебное пособие

Редактор *Р. М. Рябая*
Компьютерная верстка *Д. С. Жих*
Дизайн обложки *П. П. Падалец*
Корректор *Р. М. Рябая*

Подписано в печать 05.11.2021. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 8,8. Уч.-изд. л. 10,0.
Тираж 100 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.