

Л. А. ДУДАРЬ

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ОСТЕКЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ КОНТАКТНЫМ ФОРМОВАНИЕМ С МИНИМАЛЬНЫМИ ИСХОДНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

Условия эксплуатации современных скоростных самолетов вызвали повышенные требования к материалам, из которых они изготавливаются. В частности, материалы деталей, образующих аэродинамические обводы, работают в большом эксплуатационном температурном интервале. К таким материалам относится и прозрачный пластик, применяемый в качестве материала для деталей остекления.

При полете на больших высотах работа экипажа самолета из-за низкого атмосферного давления воздуха чрезвычайно затруднена даже при использовании кислородных приборов.

С целью обеспечения нормальных условий работы экипажа авиационная техника пошла по пути создания герметических кабин. Герметичность в таких кабинах достигается за счет получения плотно-прочных швов в местах соединения металлической конструкции каркаса с обшивкой самолета и каркаса фонаря кабины с деталями остекления.

Таким образом, детали остекления в условиях эксплуатации подвергаются воздействию аэродинамических нагрузок; избыточного давления; резких температурно-влажностных колебаний.

Первые возрастают с увеличением скорости, второе —

с увеличением высотности, третьи, кроме этого, зависят от климатических условий на стоянках самолетов.

Все вышеизложенные воздействия создают в деталях остекления эксплуатационные напряжения, которые могут быть учтены конструктором при проектировании фонаря в целом. Зная физико-механические свойства прозрачного термопластичного материала и эксплуатационные нагрузки, конструктор, исходя из срока службы остекления летательного аппарата, может рассчитать толщину применяемого материала.

При формировании остекления и при его механической обработке возникают остаточные напряжения. Вследствие упругой отдачи при формировании и недостаточной увязки сопрягаемых привалочных поверхностей в деталях остекления могут возникнуть монтажные напряжения. В отличие от напряжений эксплуатационных, в дальнейшем будем называть их исходными.

Исходные растягивающие напряжения, как постоянно действующие, вредны и часто являются причиной не только образования «серебра», но и значительного сокращения срока надежной эксплуатации деталей. Известны случаи, когда на деталях остекления «серебро» проявлялось уже через несколько часов после их изготовления. Чаще «серебро» появлялось через несколько суток. Поэтому для повышения эксплуатационного ресурса деталей остекления величина исходных растягивающих напряжений должна быть сведена до минимума.

Практически существует два пути получения деталей с минимальными исходными растягивающими напряжениями.

Первый путь состоит в проведении операций формирования, механической обработки и монтажа по режимам, исключая возникновение в стекле напряжений, превышающих допустимые. Этого можно достигнуть, если формирование деталей вести при температуре на 10—15°C выше точки размягчения стекла, а механическую обработку производить в условиях, исключая увеличение температуры стекла выше температуры начала его размягчения. Если кроме того, обеспечить надлежащую увязку сопрягаемых поверхностей стекла и каркаса и затяжку болтов крепления тарированными ключами, то исходные растягивающие напряжения могут быть сведены до $20 \div 25 \text{ кгс/см}^2$, что вполне допустимо. Однако точное соблюдение всей совокупности этих условий в

производстве далеко не просто и требует совершенствования технологического процесса.

Второй способ получения деталей остекления с малыми напряжениями состоит в проведении отжига. Эта технологическая операция вносит определенные осложнения в производственный процесс, ведет к увеличению длительности производственного цикла изготовления фонарей, требует дополнительных производственных площадей, расхода энергии и затрат на обслуживание тепловых агрегатов. Кроме того, не все детали остекления по своим геометрическим размерам могут быть подвергнуты отжигу.

Поэтому, следует считать проведение отжига как основного способа получения деталей остекления с малой величиной исходных напряжений в целом ряде случаев технически неоправданным и экономически нецелесообразным.

Работы по повышению эксплуатационной живучести самолетного остекления в настоящее время ведутся в нескольких направлениях:

1. Создание новых марок прозрачных пластиков, обладающих более высокими прочностными показателями.

2. Разработка новых конструкций деталей остекления и их крепления, исключающих возникновение изгибающих моментов в заделке.

3. Формование деталей остекления из ориентированного термопласта.

4. Разработка инструмента для механической обработки, исключающей нагрев остекления.

5. Разработка технологической оснастки для контактного формования, обеспечивающей изготовление деталей остекления с минимальными исходными напряжениями.

В настоящей работе излагаются результаты исследований по контактному формованию деталей остекления с минимальными исходными напряжениями и оптически чистой поверхностью.

НЕДОСТАТКИ КОНТАКТНОГО ФОРМОВАНИЯ

Большинство деталей остекления современного самолета по конфигурации имеет более сложную форму, чем тела вращения. Получение таких деталей в настоящее время возможно только контактными способами формования, т. е. способами, при которых разогретая заготовка из термопластичного

прозрачного материала соприкасается с оформляющими поверхностями оснастки.

Для всех наиболее распространенных способов контактного формования характерен общий недостаток — получение на формуемых деталях отпечатков текстуры материала, оформляющего поверхность оснастки.

В целях улучшения качества формуемых деталей оформляющие поверхности оснастки оклеиваются дорогостоящей оленьей замшей. Однако и оклейка замшей не позволяет получить деталей требуемой оптической чистоты поверхности без подстуживания горячей заготовки перед укладкой ее на опорную поверхность штампа или болванки. Такое подстуживание поверхности заготовок приводит к появлению зон со значительными уровнями напряжений в поверхностных слоях материала заготовки при его формовании, так как деформация поверхностных слоев происходит в зоне, где достаточно велика разница условного высокоэластического модуля по толщине листа.

Детали, отформованные с такими напряжениями, обладают упругой отдачей и большой склонностью к «серебрению».

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ. ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Вследствие неоднородности нагрева и охлаждения различных зон детали смежные макрообъемы материала в одно и то же время стремятся получить различные удлинения.

Благодаря сплошности материала и, следовательно, невозможности произвольного изменения объема, эти макрообъемы претерпевают упругую деформацию и оказываются напряженными, причем величина и знак напряжений (растягивающих или сжимающих) зависит от величины и знака упругих деформаций.

Возникшие остаточные напряжения взаимно уравновешиваются в пределах обрабатываемой детали, этим они отличаются от рабочих напряжений, которые возникают в изделии при приложении внешних усилий. Наиболее изученным в настоящее время является распределение таких напряжений, которые уравновешиваются в объемах всего тела или его значительных частей.

По длительности существования напряжения в материале

могут быть разделены на технологические и остаточные.

Технологические напряжения возникают в течение процесса нагрева, формования и охлаждения. По окончании технологического процесса напряжения могут полностью исчезнуть. Если же возникшие в период нагрева и охлаждения напряжения вызовут местные остаточные деформации, то появляются остаточные напряжения.

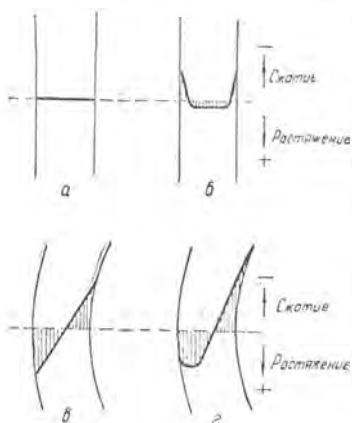
Остаточные напряжения поддаются качественной и количественной оценке. В то же время существующие методы исследования остаточных напряжений позволяют с достаточной точностью определить величину и характер распределения их только в изделиях простой формы — плоских и цилиндрических. Поэтому основные закономерности и устанавливаются обычно на таких типах изделий, а оценку напряженного состояния сложного изделия оказывается возможным сделать только приближенно.

Как известно, при нагреве термопластичный материал проходит три существенно отличных друг от друга состояния: стеклообразное, высокоэластическое и вязкотекучее с наличием переходных зон из одного состояния в другое.

При быстром охлаждении детали, нагретой ниже границы стеклообразного состояния, остаточные напряжения не наблюдаются, возникают лишь упругие термические напряжения. Если быстро охладить стекло, нагретое до температуры начала высокоэластического состояния, то в стекле возникают самоуравновешенные остаточные напряжения, обусловленные неравномерностью охлаждения по толщине.

Вначале из-за высокого температурного перепада происходит очень интенсивное остывание и, следовательно, укорочение внешних слоев; их сопротивляемость деформациям повышается по мере понижения температуры. В этой стадии внутренняя зона, сохраняя высокую температуру, подобна очень вязкой жидкости; она препятствует свободному укорочению наружных слоев, в них возникают напряжения растяжения. Однако при дальнейшем охлаждении разница температур наружных слоев и окружающей среды уменьшается, вследствие чего укорочение снаружи замедляется, его обгоняет остывание и сокращение внутренней зоны. Поэтому во внешних слоях возникают напряжения сжатия, а сердцевина

соответственно растягивается. Температурные напряжения тем выше, чем больше скорость охлаждения.



Фиг. 1. Наложение остаточных напряжений и напряжений изгиба

а—в полностью отожженном образце нет остаточных напряжений; б—остаточные напряжения в образце, охлажденном потоком воздуха; в—напряжения, вызванные изгибом; г—суммарные напряжения (от изгиба и остаточные).

напряжения сжатия, как показано на фиг. 1в. При изгибе образца, охлажденного в условиях интенсивного теплосъема, картина напряженного состояния усложняется. Распределение напряжений в этом случае показано на фиг. 1г.

ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ КОНТАКТНОГО ФОРМОВАНИЯ НА ФОРМОУСТОЙЧИВОСТЬ ДЕТАЛИ ОСТЕКЛЕНИЯ

При разработке технологического процесса изготовления деталей остекления контактным формованием возможное влияние технологических и остаточных напряжений чаще всего не учитывается. Однако практика показывает, что вопрос о влиянии таких напряжений на формоустойчивость деталей остекления, которые следует отнести к малоэластичным изделиям пространственной формы, является актуальным и требует всестороннего изучения.

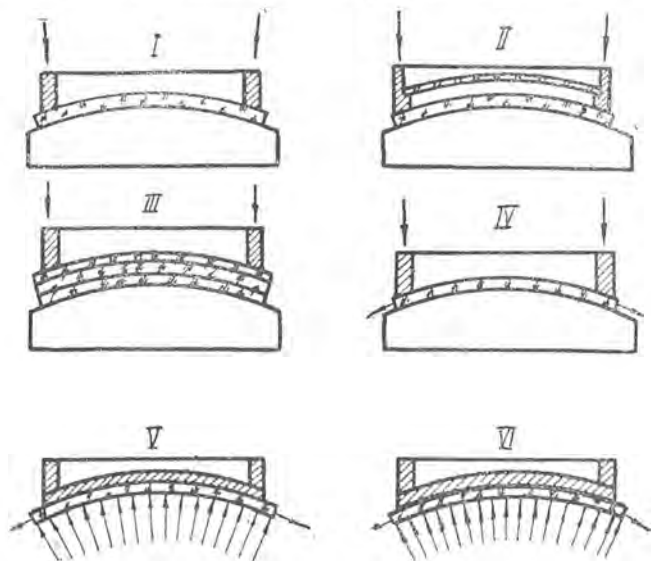
В качестве примера на фиг. 2 показаны шесть схем изготовления детали остекления контактным формованием.

Так как наружные сжатые слои в остывшей заготовке сравнительно малы по толщине, то из условия самоуравновешенности напряжения сжатия в них гораздо больше, чем напряжения растяжения внутренней зоны. Распределение напряжений, определенное классическим методом фотоупругости на образцах, подвергнутых полному отжигу, показано на фиг. 1а и в образцах, быстро охлажденных, на фиг. 1б.

Медленное охлаждение стекла, нагретого до температуры начала высокоэластического состояния, не приводит к появлению в детали остаточных напряжений. В этом случае говорят, что стекло отожжено.

При изгибе отожженного образца на выпуклой стороне возникают растягивающие напряжения, а на вогнутой — напряжения

1. а) нагрев в печи до высокоэластического состояния;
 б) подсуживание поверхностных слоев нагретой заготовки на воздухе для предотвращения возникновения отпечатков от контакта с оформляющей поверхностью оснастки;



Фиг. 2. Схемы изготовления деталей остекления контактным методом.

в) формование на болванке с открытой прижимной рамкой.

II. Аналогичный процесс нагрева в печи и последующее подсуживание перед формованием с той лишь разницей, что формование осуществляется с прижимной рамкой, имеющей термозащитный кожух.

III. Формование детали в защитном пакете между двумя заготовками из органического стекла.

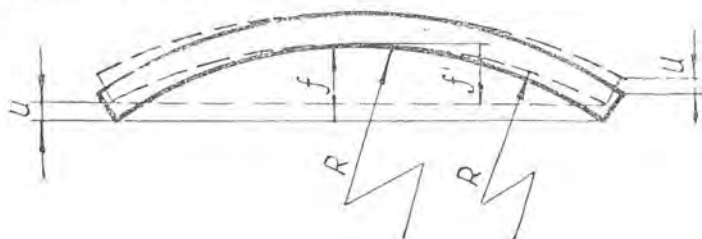
IV. Формование детали по первому и второму способу из заготовки предварительно ориентированного стекла.

V. Формование детали из ориентированного стекла по совмещенной технологии с подсуживанием заготовки перед контактированием с оформляющей поверхностью инструмента.

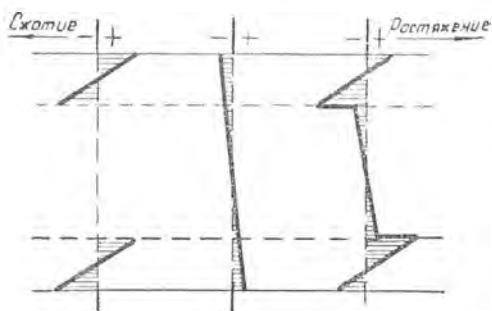
VI. Формование детали из ориентированного стекла по совмещенной технологии без подсуживания заготовки перед

контактированием с оформляющей поверхностью инструмента.

Возникающие в результате нагрева, формирования и охлаждения напряжения приводят, в зависимости от принятой схемы, к различным искажениям формы.



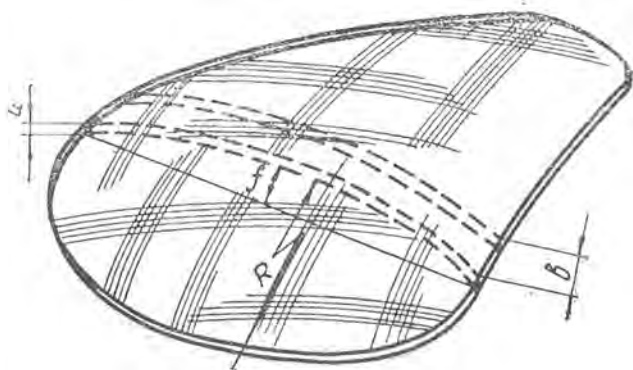
Фиг. 3. Деформация детали после снятия прижима.



Фиг. 4. Схема возникновения напряжений при формировании стекла с предварительным подстуживанием поверхности.

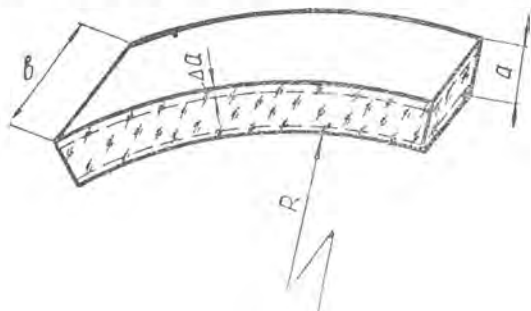
a—в положении прижатом рамкой; *b*—в положении, когда рамка снята и модуль упругости стал одинаковым по всему сечению; *в*—суммарные остаточные напряжения.

Например, при контактном формировании в наружных подстуженных слоях возникают изгибные напряжения, которые остаются и после остывания стекла. При снятии прижима момент от внешней нагрузки исчезает, а имеющиеся внутренние напряжения в подстуженных слоях приводят к отпружиниванию детали (фиг. 3), в результате чего напряженное состояние в сечениях оказывается самоуравновешенным (фиг. 4). Ориентировочную оценку искажения формы можно здесь получить, если рассмотреть деформацию отдельного элемента детали остекления (фиг. 5). С этой целью вырежем из детали двумя смежными поперечными сечениями полоску шириной *b* вдоль линиигиба меньшего радиуса кривизны. Пренебрегая кривизной в другом направлении и действием примыкающих частей детали, определим изменение стрелы прогиба под действием возникших напряжений.



Фиг. 5. Деталь остекления кабины с выделенным элементом.

Материал вырезанного элемента с подстуженными слоями рассматриваем как трехслойную пластинку (фиг. 6) с мягким заполнением, где каждый подстуженный слой работает на из-



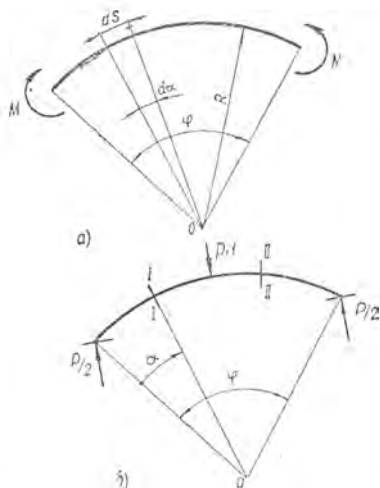
Фиг. 6. Элемент прозрачного термопласта с условным выделением толщины подстуженных слоев.

гиб самостоятельно. После затвердевания стекла по всей толщине и снятия прижимной рамки стекло несколько разогнется под воздействием суммарного момента в ранее подстуженных слоях,

$$M = M_1 + M_2, \quad (1)$$

показанного на фиг. 7.

Так как отношение толщины стекла a к радиусу R , как правило, всегда мало, то нормальные и перерезывающие силы



Фиг. 7. Расчетная схема определения деформаций прогиба элемента стекла отформованного с предварительным подстуживанием от действия:

а — суммарного момента ранее подстуженных слоев; б — единичной силы.

Положив $\bar{M} = \frac{R}{2} \left[\sin \frac{\varphi}{2} - \sin \left(\frac{\varphi}{2} - \alpha \right) \right]$ и выполнив интегрирование, имеем:

$$U = \frac{MR^2}{E \cdot I} \cdot 2 \left(\frac{\varphi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} + \cos \frac{\varphi}{2} - 1 \right). \quad (4)$$

Действительная величина перемещения и уровень напряжений будут несколько иными вследствие релаксации напряжений. В практических целях при изготовлении деталей остекления явления релаксации используются весьма широко.

При изготовлении деталей остекления контактным формованием явления релаксации будут наблюдаться в любой из шести рассмотренных схем. Вместе с тем, явления релаксации напряжений наиболее полно используются без увеличения производственного цикла только в схемах III и VI.

В меньшей мере явления релаксации используются при формовании по схемам I, II, IV, V, однако применение термокожуха в определенной мере увеличивает релаксационные явления.

можно не учитывать, и изменение стрелы прогиба U от действия момента M определять на основании известной зависимости для бруса малой кривизны

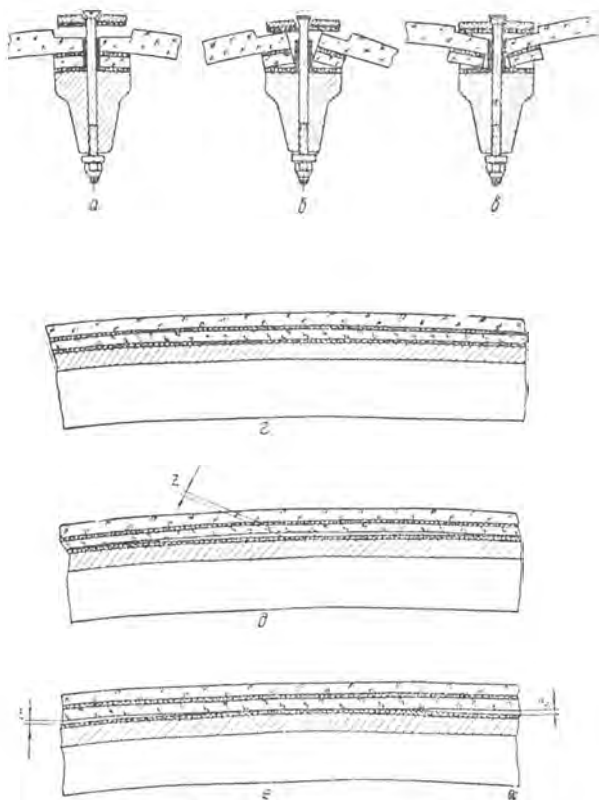
$$U = \int_l \frac{M \bar{M} ds}{E \cdot I}, \quad (2)$$

где \bar{M} — изгибающий момент от единичной силы, приложенной в месте определения прогиба (фиг. 7б). Приведенную зависимость можно записать в виде

$$U = \int_l \frac{M \bar{M} ds}{E \cdot I} = 2 \int_0^{\frac{\varphi}{2}} \frac{M \bar{M} R dx}{E \cdot I}. \quad (3)$$

Детали, отформованные контактным методом по схемам, требующим предварительного подстуживания заготовок, в результате упругой отдачи являются невзаимозаменяемыми.

При монтаже подобных деталей в каркасе фонаря наблюдаются некачественные сопряжения привалочных поверхностей, которые, в свою очередь, приводят к появлению опасных монтажных напряжений в зоне растяжения.



Фиг. 8. а, б, в — сопряжения привалочных поверхностей деталей остекления с каркасом соответственно: нормальное и дефектные в виде открытой и закрытой малок стекла; г, д, е — сопряжения по образующей соответственно: нормальное и наличие неравномерного зазора между деталью остекления и каркасом.

На фиг. 8 *а, б, в* показаны соответственно нормальное и дефектные сопряжения привалочных поверхностей в виде открытой и закрытой малок стекла, а на фиг. 8 *г, д, е* — соответственно, нормальное сопряжение по образующей и наличие неравномерного зазора между сопрягаемыми привалочными поверхностями каркаса и детали остекления.

Для устранения указанных дефектов формования деталей остекления в целом ряде случаев применяется самостоятельная технологическая операция отжига стекла. В одних случаях такая операция проводится непосредственно после формования, т. е. после окончательного ее остывания и проверки контролером. В других случаях такой операции отжига подвергается целиком смонтированный фонарь, причем приформовывание несопряженных кромок деталей остекления к привалочным поверхностям каркаса при температуре отжига достигается за счет их постепенного подтягивания.

Необходимость проведения самостоятельной операции отжига деталей остекления связана, в свою очередь, с увеличением производственного цикла, площадей, оборудования, электроэнергии и затрат рабочего времени, что в совокупности увеличивает стоимость изготовления фонарей. Как указывалось выше, все эти затраты исключаются, если обеспечивается контактное формование деталей остекления с минимальными остаточными напряжениями.

КОНТАКТНОЕ ФОРМОВАНИЕ С МИНИМАЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Формование деталей из нагретого пакета заготовок по третьему варианту схемы, показанной на фиг. 2, устраняет перечисленные недостатки, но обладает существенным экономическим недостатком, так как связано с большим расходом дорогостоящего термопластичного материала и исключает использование вакуумного формования в матрицу.

Возможность получения удовлетворительных результатов по оптической чистоте при сухом контакте с опорной металлической поверхностью высокой чистоты обработки доказана, в работе [1], однако не может быть рекомендована, так как использование этого метода ограничивается сложностью изготовления поверхности большой площади с такой высокой чистотой обработки.

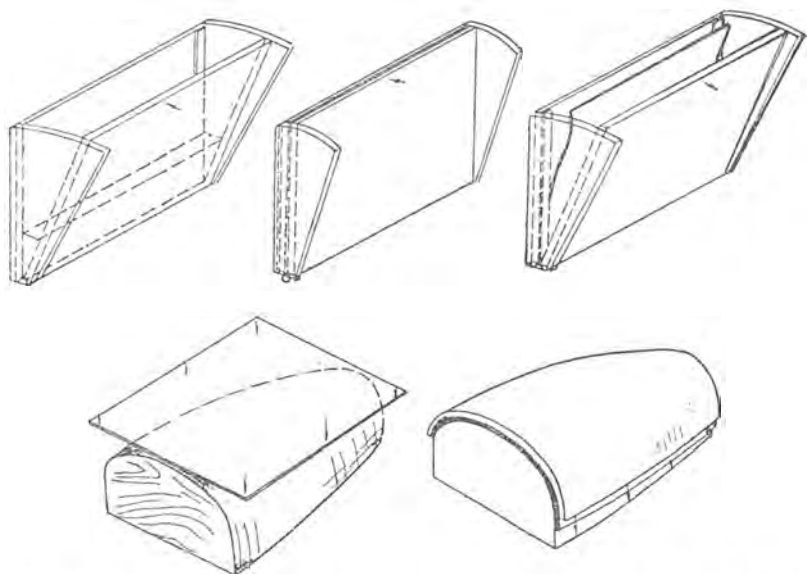
Автором разработан новый способ изготовления опорной контактной поверхности формовочной оснастки высокой чистоты путем слепка с плоской зеркальной поверхности сили-

катного или органического стекла. В отличие от способа, предложенного в работе [2], настоящий способ не требует какого-либо громоздкого оборудования и может быть осуществлен в любой формовочной мастерской.

В качестве материала слепка берется компаунд, который представляет собой термостойкий эластичный материал, получаемый смешением двух компонентов: пасты К и катализатора № 18. В результате смешения при комнатной температуре происходит вулканизация пасты К, которая при этом переходит из вязкотекучего состояния в резиноподобное.

Облицовочный пластик в виде пластины получается методом выжимания указанного материала в форме между зеркальными поверхностями силикатного или органического стекла. Полимеризуется такая композиция при комнатной температуре без давления в течение суток.

Схема получения и применения облицовочного пластика в виде листовой заготовки показана на фиг. 9.

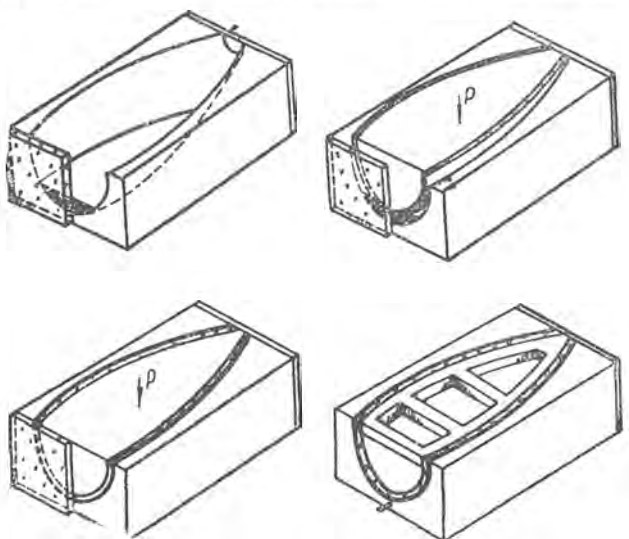


Фиг. 9. Схема получения и применения облицовочного пластика в виде листовой заготовки:

а—исходное положение формы с залитым в нее компаундом жидкой консистенции; б—окончание выжимания компаунда и выдержка для полимеризации; в—раскрытие формы и извлечение листа заполимеризовавшегося эластичного облицовочного пластика; г—покрытие опорной поверхности формовочной болванки облицовочным пластиком; д—формование детали остекления из прозрачного термопласта на болванке, облицованной пластиком.

Изготовленный согласно приведенной схеме температуростойкий эластичный пластик является как бы переносчиком высокой чистоты обработки плоской зеркальной поверхности силикатного или органического стекла на поверхности любой кривизны в силу своей эластичности.

Облицовывание штампа с вогнутой рабочей поверхностью достаточно просто осуществляется по схеме, представленной на фиг. 10. В этом случае необходимо изготовление технологического пуансона, обтянутого листовой заготовкой органи-



Фиг. 10. Схема облицовывания пластиком штампа с вогнутой поверхностью:

а—исходное положение формовочной матрицы с залитым в нее компаундом жидкой консистенции; *б*—начало выжимания компаунда в форме; *в*—окончание выжимания компаунда и поддержка для полимеризации; *г*—формовочная матрица, облицованная эластичным пластиком в состоянии окончания вакуумного формования детали остекления.

ческого стекла в высокоэластичном состоянии без подстуживания с тем, чтобы поверхность технологического пуансона имела строго заданную геометрию.

Настоящий способ получения облицовочного пластика отличается простотой выполнения, отсутствием необходимости применять нагрев, позволяет получить заготовки практически любых размеров.

На фиг. 11 показаны оптические характеристики образца

органического стекла, отформованного одновременно на поверхности, облицованной частично оленьей замшей, и частично пластиком из компаунда.

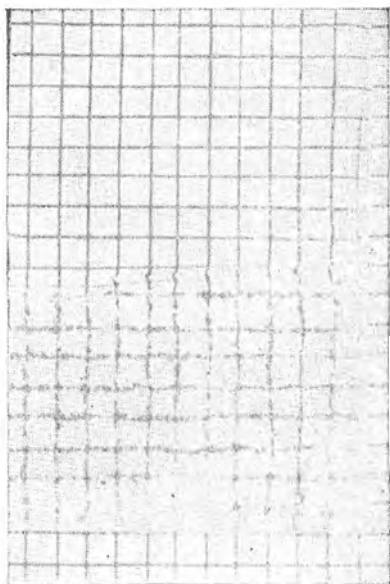
Формование производилось без предварительного подстуживания заготовок избыточным давлением воздуха в 1 кгс/см^2 . Та часть стекла, которая формовалась на поверхности, облицованной замшей, потеряла необходимые оптические свойства, другая же часть стекла, которая формовалась на поверхности, облицованной пластиком, полностью их сохранила.

В ы в о д ы

1. Проведенные исследования условий контактного формования позволили вскрыть механизм нарушения формоустойчивости деталей остекления в результате влияния предварительного подстуживания заготовок, а также показать пагубность таких последствий при монтаже деталей остекления в металлический каркас фонаря.

2. В целях исключения подобных явлений разработан сравнительно простой способ получения опорной поверхности формовочной оснастки с высокой чистотой из температуростойкого эластичного пластика. Такая оснастка позволяет получить детали остекления с минимальными напряжениями и хорошими оптическими свойствами при формовании их из ориентированного или неориентированного прозрачного термопласта контактным методом.

3. При контактном формовании без подстуживания заготовок значительно сокращается расход дорогостоящего прозрачного термопласта за счет резкого уменьшения технологических припусков, так как прижим заготовки разогретого прозрачного термопласта к контактной поверхности при



Фиг. 11. Образец отформованной заготовки стекла без подстуживания на поверхности облицованной замшей и пластиком.

формовании осуществляется в зоне последующей заделки в каркас.

Кроме того, на заготовке по периметру остается оттиск, который упраздняет операцию разметки под механическую обработку после формования и, следовательно, сокращается трудоемкость изготовления деталей.

4. Исключается влияние индивидуальных навыков и опыта отдельных исполнителей, производящих формование, и гарантируется идентичность качества деталей, что в свою очередь обеспечивает взаимозаменяемость деталей остекления без особых затрат на подгонку привалочных поверхностей и исключает появление монтажных напряжений.