

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 629.7.12

Обоснование требований к технологии формования элементов конструкций органического остекления методом горячего прессования

Д.Е. Чечин¹, М.П. Данилаев², Д.Н. Петрачков¹

¹ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»

² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ

Justification of requirements to the process of organic glazing structural elements moulding using the pressure sintering

D.E. Chechin¹, M.P. Danilaev², D.N. Petrachkov¹

¹ ORPE Technologiya named after A.G. Romashin

² Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI

Большую часть сложнопрофильных изделий авиационного остекления изготавливают из листовых термопластов методом горячего прессования на формообразующую поверхность матрицы. Определены допустимые дефекты на формообразующей поверхности матрицы, при которых оптические искажения изделия авиационного остекления из монолитного поликарбоната остаются приемлемыми. Приведены зависимости оптических искажений от толщины авиационного остекления и размеров дефектов на поверхности матрицы.

EDN: HAYKUL, <https://elibrary/haykul>

Ключевые слова: авиационное остекление, оптические искажения, технология формования, монолитный поликарбонат, дефекты поверхности

Most complex-profile aviation glazing products are made from the sheet thermoplastics by pressure sintering on the matrix moulding surface. The paper determines permissible defects on the matrix moulding surface. Such defects are acceptable not to distort optics of the aviation glazing products made of monolithic polycarbonate. The paper provides the optical distortions dependences on the aviation glazing thickness and the defects size on the matrix surface.

EDN: HAYKUL, <https://elibrary/haykul>

Keywords: aviation glazing, optical distortions, moulding technology, monolithic polycarbonate, surface defects

Повышение эксплуатационных и технических характеристик современной авиации неразрывно связано с улучшением свойств материалов и технологий, применяемых при изготовлении составных частей самолетов и вертолетов [1–10]. Появление новых функциональных материалов значительно расширило возможности вновь проектируемых и серийно выпускаемых машин. Например, использование органического стекла (полиметилметакрилата, поликарбоната) вместо силикатного стекла позволило перейти от остекления кабины пилота с плоскими рублеными формами к обтекаемому аэродинамическому профилю, что привело к снижению аэродинамического сопротивления, улучшению обзорности и снижению массы.

Совершенствование характеристик летательного аппарата (ЛА) предполагает повышение требований к элементам его конструкции [11]. Так, при высокой скорости у пилота гораздо меньше времени на оценку форм, размеров и местоположения наблюдаемых объектов. Это накладывает ограничения на допустимые величины оптических искажений, вносимых остеклением кабины, и требует повышения качества изготовления элементов остекления.

Поэтому возрастают требования к технологии производства деталей и оборудованию [12–14] при изготовлении сложнопрофильного остекления из листового полиметилметакрилата (ПММА) или монолитного поликарбоната (ПК). Следует отметить, что на оптические характеристики элементов остекления кабины ЛА, как правило, влияют несколько факторов. Например, оптические неоднородности в стекле могут возникать вследствие неоднородного нагрева материала, дефектов формообразующей матрицы и неравномерности механического давления при прессовании [15].

Наибольшее влияние на величину оптических искажений в остеклении оказывает каче-

ство формообразующей поверхности (ФОП) матрицы, с которой соприкасается размягченный лист ПММА или монолитного ПК в процессе формования изделия остекления [16, 17]. Все дефекты, имеющиеся на поверхности матрицы, неизбежно оставят отпечатки на поверхности формируемого материала, которые приводят к появлению оптических искажений. В ряде случаев удается устранить подобные дефекты полировкой поверхности стекла [18, 19]. Однако при использовании ПК для изготовления элементов остекления ЛА полировка затруднительна ввиду его высокой вязкости [20].

Цель работы — уточнение требований к технологии формования конструкций остекления ЛА из ПК, обеспечивающих допустимые дефекты на ФОП матрицы, при которых оптические искажения в изделии авиационного остекления из монолитного ПК остаются приемлемыми.

Экспериментальные методы и материалы.

Для достижения поставленной цели при проведении экспериментов имитировали следующие типы дефектов: посторонний предмет на ФОП матрицы, отслоение материала ФОП, растрескивание материала ФОП.

Для определения допустимых дефектов на ФОП матрицы изготавливали оснастку для формования образцов из монолитного ПК вакуумно-контактным способом. Оснастка содержала алюминиевую плиту размером 200×200 мм и толщиной 35 мм. На торце плиты устанавливали штуцер для подключения вакуумного насоса, а сверху нее, по периметру, — силиконовый уплотнитель (рис. 1).

Сверху на плиту укладывали лист полированной нержавеющей стали размером 180×180 мм, на который заранее наносили дефект заданного размера и формы. В экспериментальных исследованиях размер и форму дефекта изменяли с целью определения допустимого размера дефекта на ФОП матрицы, наличие ко-

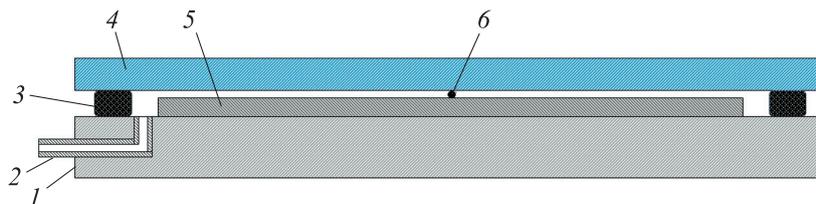


Рис. 1. Внешний вид оснастки для формования образцов:
1 — алюминиевая плита; 2 — вакуумный штуцер; 3 — силиконовый уплотнитель;
4 — монолитный ПК; 5 — лист полированной нержавеющей стали;
6 — посторонний предмет

торого приводит к образованию в образце оптических искажений в заданных пределах.

В качестве типовых посторонних предметов, которые наиболее часто попадают между формой и монолитным ПК при формировании изделия остекления, использовали песчинку диаметром 0,45 мм, а также куски медной проволоки диаметром 0,08 мм и длиной 50 и 2 мм.

Для имитации отслоений материала поверхности формы на лист полированной нержавеющей стали поочередно укладывали стальные полосы шириной 12 мм, толщиной 0,03 и 0,08 мм. Для имитации растрескивания материала поверхности формы на листе полированной нержавеющей стали размещали алюминиевую полосу шириной 50 мм и толщиной 0,07 мм. Поверх нержавеющей стали и силиконового уплотнителя укладывали образец из монолитного ПК.

Для размягчения образца оснастку и образец размещали в нагревательном шкафу. Материал нагревали до 140 ± 3 °C за 60 ± 5 мин с последующей выдержкой в течение 30 ± 1 мин. Затем за 30 ± 3 мин температуру повышали до $155,0 \pm 1,5$ °C и выдерживали оснастку с образцом 20 ± 1 мин для равномерного прогрева образца по всей толщине. После этого между оснасткой и образцом создавали разряжение, за счет чего прижимали размягченный образец ПК к листу нержавеющей стали с нанесенным дефектом.

В таком состоянии оснастку и образец выдерживали при температуре $155,0 \pm 1,5$ °C еще 10 ± 1 мин. После снижения температуры до 80 ± 5 °C выключали вакуумный насос. Образец ПК вынимали из нагревательного шкафа по достижении температуры 25 ± 3 °C и размещали на оптической установке (рис. 2) для определения размеров искажений. Такой температурный режим соответствует режиму формования серийных изделий из монолитного ПК.

Для определения допустимых размеров дефектов использовали оптическую установку, соответствующую ГОСТ 33003–2914 «Методы определения оптических искажений».

Через исследуемый элемент оптического остекления проектор 1 проецировал изображение эталона, состоящее из черного фона и белых линий — одной вертикальной и набором горизонтальных линий с фиксированными толщинами и интервалами между линиями. Изображение проецировалось на полупрозрачный экран 4, за которым находилась фотокамера, фиксирующая изображение с высокой разрешающей способностью.

В экспериментах использовали фотокамеру Canon с разрешением матрицы 6720×4480 пикселей. Установка позволяет устанавливать изделие остекления под различными углами относительно оптической оси. Этим имитировали угол визирования, под которым пилот смотрит через исследуемый элемент конструкции оптического остекления.

Оптическая установка дает возможность определять оптические искажения в изделиях авиационного остекления, которые согласно ОСТ 1 02634–87 «Показатели качества изделий конструкционной оптики» характеризуются следующими параметрами: угловым отклонением оптического луча, проходящего через остекление; нерезкостью и деформацией изображения, прошедшего через элемент конструкции остекления. Угловое отклонение показывает угол, на который смещаются линии сетки при прохождении их изображения через остекление.

Угловое отклонение измеряли под углом 0 и 90° относительно вертикальной и горизонтальной оси соответственно (рис. 3). Нерезкость изображения определяет размытие (увеличение толщины изначально четкой линии проецируемой сетки), а деформация изображения —

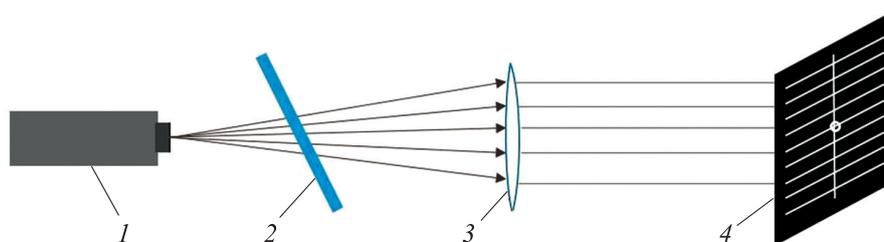


Рис. 2. Структурная схема оптической установки для определения размеров искажений:

1 — проектор; 2 — изделие остекления; 3 — собирающая линза; 4 — полупрозрачный проекционный экран

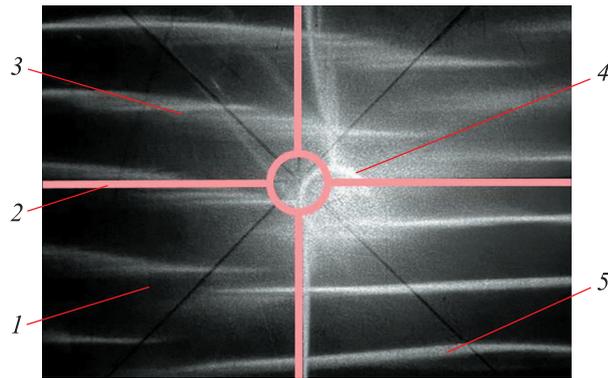


Рис. 3. Примеры оптических искажений: 1 — разрыв линий сетки; 2 — исходный вид линий сетки (выделен розовым цветом); 3 — нерезкость изображения; 4 — угловое отклонение; 5 — деформация изображения

угол искривления изначально прямой линии проецируемой сетки. Деформацию измеряли на отрезках, называемых базой, с шагом 50 мм. В экспериментах дополнительно оценивали слияние и разрыв линий сетки. В случае наличия хотя бы одного из приведенных дефектов изделие остекления считали непригодным для использования.

Современные изделия авиационного остекления, как правило, имеют криволинейную в двух плоскостях форму поверхности, что вносит дополнительные оптические искажения. Рассматривали только искажения, вносимые дефектами на поверхности формообразующей матрицы. В экспериментах учитывали, что искажения в изогнутых изделиях остекления выше, чем в плоских образцах. Поэтому типовые значения максимально допустимых искажений выбирали следующим образом: угловое отклонение — не более $8'$, нерезкость изображения — не более $12'$, деформация изображения на базах 50 и 100 мм — не более 6 и $8'$ соответственно.

В рассматриваемом методе оптические искажения измеряют при установке образцов под углом $45 \pm 1^\circ$ относительно оптической оси. Такой угол наклона остекления выбран в качестве среднего значения и как наиболее используемый при конструировании гражданских воздушных судов. У большей части вертолетов угол установки остекления значительно превышает 45° и может достигать 80° , а у боевых сверхзвуковых самолетов — может доходить до 25° .

При установке остекления под более острым углом значения искажений повышаются ввиду увеличения пути прохождения луча света через

остекление, и, соответственно, уменьшаются при установке остекления под более тупым углом к оптической оси. Используемая шкала для определения искажений в установке (см. рис. 2) имеет цену деления $2'$. Поэтому погрешность измерения составляла не более $1'$.

Результаты и их обсуждение. Сопоставительный анализ оптических искажений в образцах проводили относительно нулевого образца, полученного без внесения указанных ранее дефектов. Следует отметить, что оптические искажения в нулевом образце могут возникать, например, вследствие остаточных напряженных состояний в материале.

В первой серии экспериментов получены результаты измерений оптических искажений образцов монолитного ПК до и после их формования без дефекта на листе полированной нержавеющей стали. Определены оптические искажения в образце ПК толщиной $3 \pm 0,1$ и $12 \pm 0,1$ мм до формования. Максимальное угловое отклонение под углом $0 \pm 1^\circ$ составило $2 \pm 1'$, под углом $90 \pm 1^\circ$ — $2 \pm 1'$, нерезкость изображения — $2 \pm 1'$, деформация изображения на базе 50 мм — $2 \pm 1'$, на базе 100 мм — $2 \pm 1'$. Для оценки влияния структуры полированного листа нержавеющей стали на оптические искажения проведено формование образца ПК толщиной $12 \pm 0,1$ мм на лист стали без посторонних предметов и дефектов.

В результате измерений выявлено, что значения характеристик оптических искажений в образцах до и после формования не изменились. Следовательно, можно сделать вывод, что используемая технология формования образца ПК не вносит оптических искажений.

Для определения размеров оптических искажений в образцах из монолитного ПК, вызванных наличием постороннего предмета или дефекта поверхности матрицы, изготовлены десять образцов из монолитного ПК толщиной $3 \pm 0,1$ и $12 \pm 0,1$ мм. Результаты измерений оптических искажений приведены в таблице и на рис. 4, где h и L — толщина и длина постороннего предмета соответственно.

Отчетливо прослеживается связь размеров оптических искажений и толщины образца монолитного ПК (рис. 3, а–з): чем она больше, тем значительнее искажения (см. таблицу), образовавшиеся в результате отпечатывания дефекта. Искажения образца № 1 толщиной $3 \pm 0,1$ мм после контакта с песчинкой остаются в допу-

Результаты измерений оптических искажений

Номер образца	Толщина образца мм	Тип дефекта на поверхности матрицы	Угловое отклонение, угл. мин, под углом, град		Нерезкость изображения, угл. мин	Деформация изображения, угл. мин, на базе, мм		Разрыв линии	Слияние линий
			0 ± 1	90 ± 1		50 ± 5	100 ± 5		
1	3 ± 0,1	Песчинка Ø = 0,45 мм	2 ± 1	2 ± 1	4 ± 1	2 ± 1	2 ± 1	–	–
2	12 ± 0,1	Песчинка Ø = 0,45 мм	10 ± 1	2 ± 1	8 ± 1	2 ± 1	4 ± 1	+	–
3	3 ± 0,1	Полоса 50 мм, $h = 0,07$ мм	2 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	2 ± 1	2 ± 1	–	–
4	12 ± 0,1	Полоса 50 мм, $h = 0,07$ мм	6 ± 1	10 ± 1	12 ± 1	4 ± 1	12 ± 1	+	–
5	3 ± 0,1	Полоса 12 мм, $h = 0,08$ мм	2 ± 1	2 ± 1	20 ± 1	2 ± 1	2 ± 1	+	+
6	12 ± 0,1	Полоса 12 мм, $h = 0,08$ мм	6 ± 1	4 ± 1	6 ± 1	2 ± 1	6 ± 1	+	–
7	3 ± 0,1	Полоса 12 мм, $h = 0,03$ мм	2 ± 1	2 ± 1	20 ± 1	2 ± 1	2 ± 1	–	+
8	12 ± 0,1	Полоса 12 мм, $h = 0,03$ мм	4 ± 1	6 ± 1	6 ± 1	2 ± 1	2 ± 1	+/-	–
9	3 ± 0,1	Проволока Ø = 0,08 мм, $L = 50$ мм	2 ± 1	2 ± 1	12 ± 1	2 ± 1	2 ± 1	+	–
10	3 ± 0,1	Проволока Ø = 0,08 мм, $L = 2$ мм	2 ± 1	2 ± 1	8 ± 1	2 ± 1	2 ± 1	–	–

Примечание. Знак «–» означает отсутствие этого явления, знак «+» — наличие, знак «+/-» — пограничное состояние между наличием и отсутствием явления.

стимых пределах, в то время как у образца № 2 толщиной $12 \pm 0,1$ мм угловое отклонение составляет $10'$, что превышает допустимый уровень $8'$. Искажения образца № 3 толщиной $3 \pm 0,1$ мм по всем параметрам находятся в допустимых пределах, а у образца № 4 толщиной $12 \pm 0,1$ мм угловое отклонение и деформация изображения выше допустимых значений.

На величину оптических искажений оказывает влияние не только толщина дефектов и посторонних предметов на поверхности матрицы, но и их ширина. Сравнение образцов одинаковой толщины (см. рис. 3, в–е) показало, что при незначительной разнице в толщине постороннего предмета искажения существенно различаются вследствие разной ширины постороннего предмета (50 и 12 мм). Причем у образцов ПК толщиной $3 \pm 0,1$ мм с ростом ширины постороннего предмета оптические искажения снижаются, а у образцов ПК толщиной $12 \pm 0,1$ мм — увеличиваются.

Так, у образца ПК толщиной $3 \pm 0,1$ мм (см. рис. 3, в) при ширине постороннего предмета 50 мм нерезкость изображения составляет $4 \pm 1'$, в то время как у образца ПК той же толщины (см. рис. 3, д) при ширине постороннего предмета 12 мм — $20 \pm 1'$, что существенно превышает допустимый уровень $12'$.

Размеры оптических искажений в образцах также зависят от длины посторонних предметов, попавших на поверхность матрицы при формировании. Как видно из рис. 3, и и рис. 3, к, с уменьшением длины проволоки диаметром 0,08 мм снижается нерезкость изображения. Так, при длине проволоки $L = 50$ мм нерезкость изображения у образца ПК толщиной $3 \pm 0,1$ мм составила $12 \pm 1'$, а при $L = 2$ мм — $8 \pm 1'$.

Причиной возникновения оптических искажений в местах наличия постороннего предмета на поверхности матрицы является образование в листе поликарбоната локальной линзы. Одной поверхностью локальной линзы служит профиль отпечатка постороннего предмета на поверхности ПК, другой — профиль противоположной поверхности ПК. Для определения параметров образовавшейся линзы необходимо знать радиусы кривизны этих поверхностей.

Радиус кривизны R_1 первой поверхности (рис. 5) будет соответствовать высоте постороннего предмета на поверхности матрицы $H_1 = R_1$. В случае, когда посторонним предметом является песчинка, будем пренебрегать локальной кривизной ее поверхности и считать песчинку шаром с диаметром H_1 .

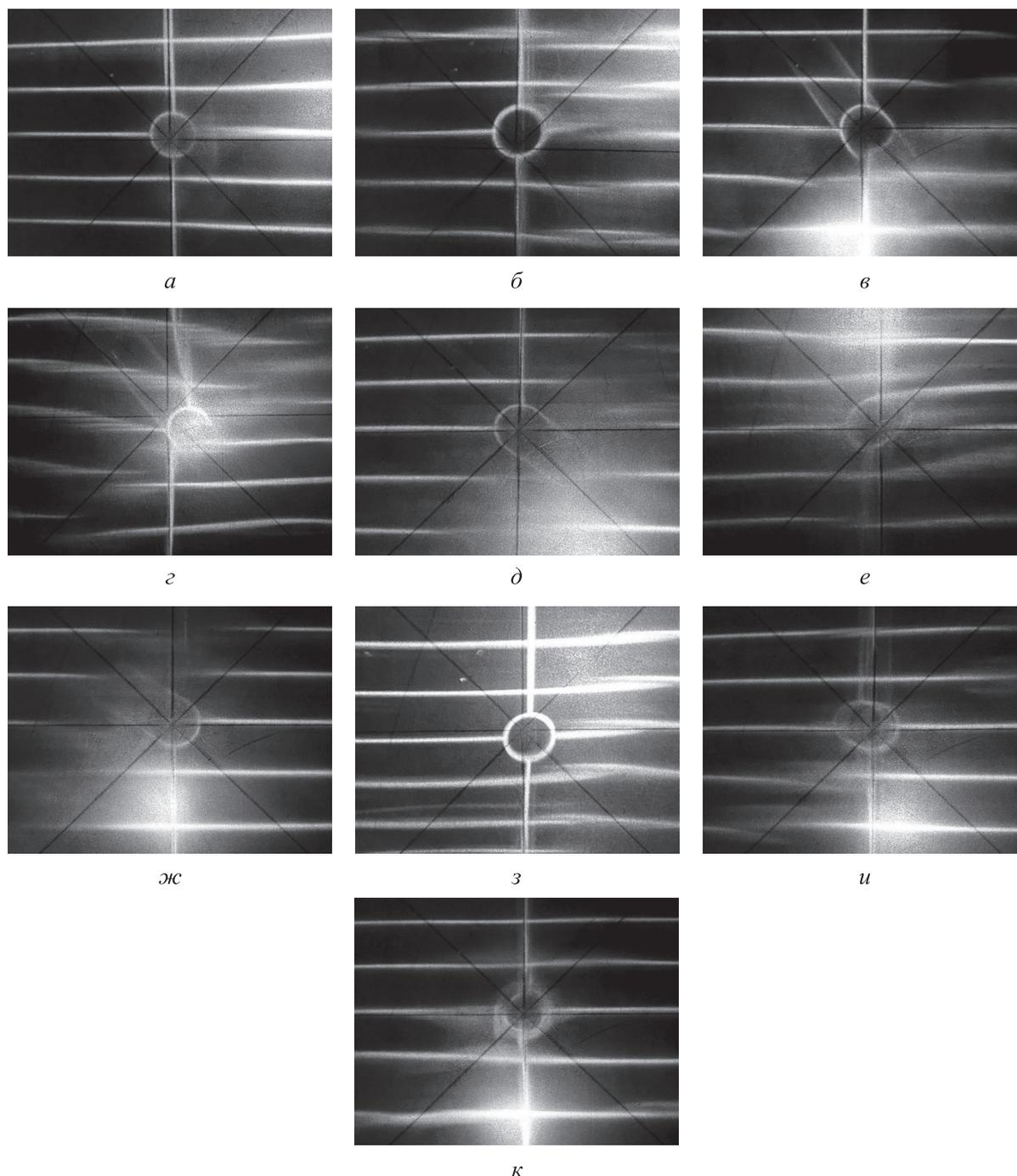


Рис. 4. Оптические искажения в образцах из ПК после контакта с посторонним предметом:
a — ПК 3 мм, песчинка $\varnothing = 0,45$ мм; *б* — ПК 12 мм, песчинка $\varnothing = 0,45$ мм; *в* — ПК 3 мм, полоса 50 мм, $h = 0,07$ мм;
г — ПК 12 мм, полоса 50 мм, $h = 0,07$ мм; *д* — ПК 3 мм, полоса 12 мм, $h = 0,08$ мм; *е* — ПК 12 мм,
 полоса 12 мм, $h = 0,08$ мм; *ж* — ПК 3 мм, полоса 12 мм, $h = 0,03$ мм; *з* — ПК 12 мм, полоса 12 мм, $h = 0,03$ мм;
и — ПК 3 мм, проволока $\varnothing = 0,08$ мм, $L = 50$ мм; *к* — ПК 3 мм, проволока $\varnothing = 0,08$ мм, $L = 2$ мм

При формовании на песчинку ПК толщиной H объем вытесненного песчинкой материала V_1 будет равен объему полусферы с радиусом R_1 :

$$V_1 = 2\pi R_1^3 / 3.$$

При вытеснении материала объемом V_1 с первой поверхности ПК на второй поверхности

образуется шаровой сегмент высотой h_2 и объемом $V_2 = V_1$:

$$V_2 = \pi h_2^2 \left(R_2 - \frac{1}{3} h_2 \right); \quad R_2 = H + h_2, \quad (1)$$

где R_2 — радиус кривизны второй поверхности линзы.

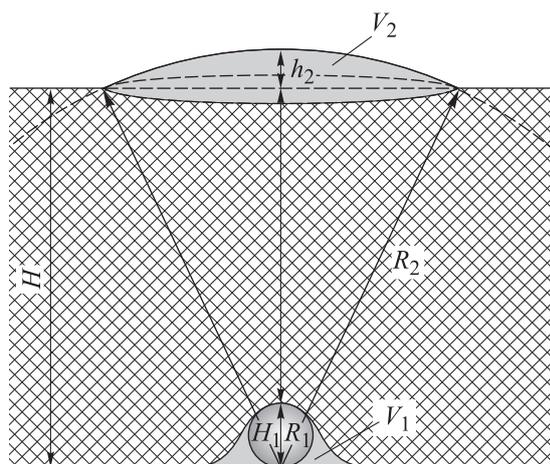


Рис. 5. Схема линзы, образовавшейся в образце из ПК после контакта с посторонним предметом

При этом полагаем, что локальная плотность ПК в месте деформации не изменяется.

Зная диаметр песчинки, находим корни системы уравнений (1) и определяем радиус кривизны второй поверхности линзы R_2 .

При отпечатывании песчинки толщиной $H_1 = 0,45$ мм на поверхности ПК толщиной $H = 3$ мм образуется рассеивающая линза с радиусами кривизны $R_1 = 0,45$ мм и $R_2 = 3,14$ мм. При толщине ПК $H = 12$ мм образуется рассеивающая линза с радиусами кривизны $R_1 = 0,45$ мм и $R_2 = 12,07$ мм.

По методике, рассмотренной в работе [21], определяем фокусное расстояние образовавшихся линз

$$f = -\frac{1}{(N-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)}; \quad N = \frac{n}{n_1},$$

где n — показатель преломления воздуха, $n = 1,000277$; n_1 — показатель преломления ПК, $n_1 = 1,6$.

Соответственно, песчинка диаметром 0,45 мм, отпечатываясь в ПК толщиной 3 мм, образует рассеивающую линзу с фокусным расстоянием $f_1 = -0,875$ мм, а в ПК толщиной 12 мм — рассеивающую линзу с фокусным расстоянием $f_2 = -0,779$ мм. Следовательно, искажения, возникающие в ПК толщиной 12 мм, будут сильнее, чем в ПК толщиной 3 мм [21], что подтверждают результаты проведенного эксперимента.

Особое внимание стоит уделить наличию разрывов и слияний линий сетки проецируемого изображения. Такие дефекты недопустимы в авиационном остеклении, поскольку значи-

тельно искажают очертания наблюдаемого пространства. В образцах ПК толщиной $12 \pm 0,1$ мм разрыв линий сетки наблюдался практически при всех посторонних предметах большой длины, и только при использовании стальной полосы толщиной 0,03 мм разрывы сетки незначительные.

Исходя из этого, можно заключить, что максимальная толщина длинных посторонних предметов (проволоки или человеческого волоса) на поверхности матрицы при формировании изделий остекления толщиной $12 \pm 0,1$ мм не должна превышать 0,03 мм. При формировании изделий остекления из ПК толщиной $3 \pm 0,1$ мм с точки зрения отсутствия разрывов сетки критическая толщина длинных посторонних предметов на матрице равна 0,07 мм. Размеры коротких посторонних предметов, при наличии которых оптические искажения остаются в допустимых пределах, а разрывы и слияния линий сетки не возникают, могут достигать 0,45 мм в диаметре.

Выводы

1. Анализ полученных результатов показал, что при увеличении толщины изделий остекления требуется обеспечить более качественную поверхность формообразующей матрицы. Максимально допустимый размер коротких посторонних предметов или дефектов на ФОРМОВАННОЙ матрице при изготовлении изделий остекления толщиной $3 \pm 0,1$ мм может достигать 0,45 мм в диаметре, а для изделий толщиной $12 \pm 0,1$ мм он не должен превышать 0,03 мм. Наличие длинных посторонних предметов или дефектов приводит к появлению недопустимых разрывов или слиянию линий сетки изображения, проецируемого сквозь изделие остекление.

2. При отсутствии возможности обеспечить требуемое качество ФОРМОВАННОЙ целесообразно для формирования заготовки изделия остекления из ПК использовать жертвенный лист, либо применять в качестве основного материала остекления ПММА с последующей полировкой, чтобы уменьшить размеры оптических искажений.

3. Использование жертвенного листа не позволяет сформировать заготовку остекления с элементами обратной кривизны, так как необходимо применять вакуумно-контактный способ формирования, при котором под действием вакуумного разряжения к ФОРМОВАННОЙ прижмется только жертвенный лист. А переход от ПК к ПММА в

качестве основного материала остекления приводит к увеличению толщины и массы остекления, поскольку прочностные свойства ПММА ниже, чем у ПК [10, 22].

Литература

- [1] Сентюрин Е.Г., Богатов В.А. Авиационные органические стекла. Проблемы и перспективы. *Авиационные материалы и технологии*, 2004, № 3, с. 3–6.
- [2] Мекалина И.В., Сентюрин Е.Г., Богатов В.А. Новые конструкционные органические стекла. *Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму*, 2009, № 3–4, с. 33–39.
- [3] Мекалина И.В., Орлова И.В., Кричевский Д.Д. и др. Особенности термической релаксации ориентированных органических стекол частично сшитой и линейной структуры. *Пластические массы*, 2021, № 3–4, с. 10–12, doi: <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-3-4-10-12>
- [4] Горелов Ю.П., Мекалина И.В., Тригуб Е.С. и др. Химическое модифицирование прозрачных акрилатных полимеров для повышения эксплуатационных свойств деталей авиационного остекления. *Российский химический журнал*, 2010, т. 65, № 1, с. 79–84.
- [5] Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». *Авиационные материалы и технологии*, 2015, № 1, с. 3–33.
- [6] Сентюрин Е.Г., Мекалина И.В., Айзатулина М.К. и др. Акрилатные высокотеплостойкие органические стекла. Опыт применения. Перспективы. *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*, 2015, т. 58, № 8, с. 22–24.
- [7] Сентюрин Е.Г., Мекалина И.В., Перова А.П. Как создавалась прозрачная авиационная броня. *Труды ВИАМ*, 2015, № 5, с. 68–74, doi: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-5-12-12>
- [8] Сентюрин Е.Г., Мекалина И.В., Айзатулина М.К. и др. История создания материалов самолетного остекления и полимерных материалов со специальными свойствами (к 75-летию лаборатории полимерных материалов со специальными свойствами). *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № 3, с. 81–86.
- [9] Сентюрин Е.Г., Мекалина И.В., Айзатулина М.К. и др. Авиационные ориентированные стекла АО-120 и АО-120А. *Пластические массы*, 2019, № 5–6, с. 60–62, doi: <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-5-6-60-62>
- [10] Мекалина И.В., Айзатулина М.К., Сентюрин Е.Г. и др. Особенности влияния атмосферных факторов на авиационные органические стекла. *Труды ВИАМ*, 2018, № 11, с. 28–34, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-11-28-34>
- [11] Петров А.А., Мекалина И.В., Сентюрин Е.Г. и др. Исследование особенностей изготовления деталей остекления из частично сшитых органических стекол. *Авиационные материалы и технологии*, 2013, № 2, с. 32–34.
- [12] Пестов А.В., Ворвуль М.М., Самсонов В.И. и др. *Устройство для формирования ударопрочных прозрачных недеформирующихся полимерных материалов*. Патент РФ 2534809. Заявл. 28.05.2013, опублик. 10.12.2014.
- [13] Пестов А.В., Ромакин А.Н., Самсонов В.И. и др. *Устройство для формирования ударопрочных прозрачных полимерных материалов*. Патент РФ 2598092. Заявл. 08.06.2015, опублик. 20.09.2016.
- [14] Виноградов В.М., Рубинчик Б.Э., Песошников А.Е. *Способ пневмовакуумного формирования изделий из органического стекла*. Патент СССР 1650463. Заявл. 29.03.1988, опублик. 23.05.1991.
- [15] Вахничева М.Г., Карпец А.К. *Остекление летательных аппаратов. Материалы. Технология*. Новосибирск, НГТУ, 1998. 64 с.
- [16] Силкин А.Н., Хмельницкий А.К., Петрачков Д.Н. и др. *Способ формирования изделий из полимерных материалов*. Патент РФ 2719838. Заявл. 24.12.2018, опублик. 23.04.2020.
- [17] Чечин Д.Е., Самсонов В.И., Шаталин В.А. и др. *Способ формирования сложнопрофильных оптических изделий*. Патент РФ 2714057. Заявл. 10.09.2019, опублик. 11.02.2020.
- [18] Акользин С.В., Фролков А.И. Восстановление работоспособности теплостойкого авиационного остекления при ремонте и в эксплуатации. *Авиационная промышленность*, 2014, № 1, с. 41–44.

- [19] Сентюрин Е.Г., Мекалина И.В., Айзатулина М.К. и др. Полирование и шлифование — эффективные методы повышения «серебростойкости» и оптических характеристик оргстекло при изготовлении и продлении ресурса авиационного остекления в эксплуатации (обзор). *Труды ВИАМ*, 2018, № 10, с. 45–52. <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-10-45-52>
- [20] Сентюрин Е.Г., Мекалина И.В., Фролков Ю.А. и др. Листовой атмосферостойкий светопрозрачный поликарбонат. Новый материал авиационного остекления. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2017, № 4, с. 28–33.
- [21] Ландсберг Г.С. *Оптика*. Москва, Наука, 1976, с. 290–293.
- [22] Петрова Г.Н., Старостина И.В., Румянцева Т.В. и др. Эффективность повышения качества изделий из поликарбоната термообработкой. *Труды ВИАМ*, 2017, № 9, с. 45–55, doi: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-9-6-6>

References

- [1] Sentyurin E.G., Bogatov V.A. Aviation organic glasses. Problems and Prospects. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2004, no. 3, pp. 3–6. (In Russ.).
- [2] Mekalina I.V., Sentyurin E.G., Bogatov V.A. New structural organic glasses. *Voprosy obronnoy tekhniki. Ser. 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu*, 2009, no. 3–4, pp. 33–39. (In Russ.).
- [3] Mekalina I.V., Orlova I.V., Krichevskiy D.D. et al. Features of thermal relaxation of oriented organic glasses with a partially crosslinked and linear structure. *Plasticheskie massy*, 2021, no. 3–4, pp. 10–12, doi: <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-3-4-10-12> (in Russ.).
- [4] Gorelov Yu.P., Mekalina I.V., Trigub E.S. et al. Chemical modification of transparent acrylate polymers to improve operational properties of aircraft glazing parts. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal*, 2010, vol. 65, no. 1, pp. 79–84. (In Russ.).
- [5] Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RU on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2015, no. 1, pp. 3–33. (In Russ.).
- [6] Sentyurin E.G., Mekalina I.V., Ayzatulina M.K. et al. Acrylate high-temperature resistant organic glasses. Experience of application. Prospects. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [CHEMTECH], 2015, vol. 58, no. 8, pp. 22–24. (In Russ.).
- [7] Sentyurin E.G., Mekalina I.V., Perova A.P. How the transparent aircraft armor was created (to the 70th anniversary of the Great victory). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2015, no. 5, pp. 68–74, doi: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-5-12-12> (in Russ.).
- [8] Sentyurin E.G., Mekalina I.V., Ayzatulina M.K. et al. The history of aircraft materials of glass and polymer materials with special properties (to the 75th anniversary laboratory of polymer materials with special properties). *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2017, no. 3, pp. 81–86. (In Russ.).
- [9] Sentyurin E.G., Mekalina I.V., Ayzatulina M.K. et al. Aviation oriented organic glasses AO-120 AND AO-120A *Plasticheskie massy*, 2019, no. 5–6, pp. 60–62, doi: <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-5-6-60-62> (in Russ.).
- [10] Mekalina I.V., Ayzatulina M.K., Sentyurin E.G. et al. Features of influence of atmospheric factors on aviation organic glass. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2018, no. 11, pp. 28–34, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-11-28-34> (in Russ.).
- [11] Petrov A.A., Mekalina I.V., Sentyurin E.G. et al. Features of manufacture of glazing parts from partially cross-linked organic glasses. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2013, no. 2, pp. 32–34. (In Russ.).
- [12] Pestov A.V., Vorvul M.M., Samsonov V.I. et al. *Ustroystvo dlya formovaniya udaroprochnykh prozrachnykh nedeformiruyushchikhsya polimernykh materialov* [Device to mould shockproof transparent non-deforming polymer materials]. Patent RU 2534809. Appl. 28.05.2013, publ. 10.12.2014. (In Russ.).
- [13] Pestov A.V., Romakin A.N., Samsonov V.I. et al. *Ustroystvo dlya formovaniya udaroprochnykh prozrachnykh polimernykh materialov* [Device to mold shockproof transparent polymer materials]. Patent RU 2598092. Appl. 08.06.2015, publ. 20.09.2016. (In Russ.).

- [14] Vinogradov V.M., Rubinchik B.E., Pesoshnikov A.E. *Sposob pnevmovakuumnogo formovaniya izdeliy iz organicheskogo stekla* [A procedure for pneumovacuum moulding of plexiglass products]. Patent USSR 1650463. Appl. 29.03.1988, publ. 23.05.1991. (In Russ.).
- [15] Vakhnicheva M.G., Karpets A.K. *Osteklenie letatelnykh apparatov. Materialy. Tekhnologiya* [Glazing of aircraft. Materials. Technology]. Novosibirsk, NGTU Publ., 1998. 64 p. (In Russ.).
- [16] Silkin A.N., Khmel'nitskiy A.K., Petrachkov D.N. et al. *Sposob formovaniya izdeliy iz polimernykh materialov* [Method of forming articles from polymer materials]. Patent RU 2719838. Appl. 24.12.2018, publ. 23.04.2020. (In Russ.).
- [17] Chechin D.E., Samsonov V.I., Shatalin V.A. et al. *Sposob formovaniya slozhnoprofilnykh opticheskikh izdeliy* [Method of forming optical complex products]. Patent RU 2714057. Appl. 10.09.2019, publ. 11.02.2020. (In Russ.).
- [18] Akolzin S.V., Frolkov A.I. Performance restoration of the heat-resistant aircraft glazing during repair and operation. *Aviatsionnaya promyshlennost* [Aviation Industry], 2014, no. 1, pp. 41–44. (In Russ.).
- [19] Sentyurin E.G., Mekalina I.V., Ayzatulina M.K. et al. Polishing and grinding – effective methods to improve the «silver resistance» and optical characteristics of plexiglas in the manufacture and extension of aviation glazing in operation (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2018, no. 10, pp. 45–52. <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-10-45-52> (in Russ.).
- [20] Sentyurin E.G., Mekalina I.V., Frolkov Yu.A. et al. Weather-resistant translucent polycarbonate sheet. New material for aircraft cockpit windows. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All materials. Encyclopaedic reference manual], 2017, no. 4, pp. 28–33. (In Russ.).
- [21] Landsberg G.S. *Optika* [Optics]. Moscow, Nauka Publ., 1976, pp. 290–293. (In Russ.).
- [22] Petrova G.N., Starostina I.V., Rumyantseva T.V. et al. Efficiency of improvement of quality of products from polycarbonate heat treatment. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2017, no. 9, pp. 45–55, doi: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-9-6-6> (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 07.06.2024

Информация об авторах

ЧЕЧИН Дмитрий Евгеньевич — инженер-технолог. АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249030, Российская Федерация, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: chechinde@technologiya.ru).

ДАНИЛАЕВ Максим Петрович — доктор технических наук, профессор кафедры электронных и квантовых средств передачи информации. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420000, Казань, Российская Федерация, ул. Карла Маркса, д. 10, e-mail: danilaev@mail.ru).

ПЕТРАЧКОВ Дмитрий Николаевич — кандидат технических наук, директор НПК «Стекло» — главный конструктор. АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249030, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: petrachkovdn@technologiya.ru).

Information about the authors

CHECHIN Dmitriy Evgenievich — Technology Engineer. ORPE Technologiya named after A.G. Romashin (249030, Obninsk, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: chechinde@technologiya.ru).

DANILAEV Maksim Petrovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Electronic and Quantum Information Transmission. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420011, Kazan, Russian Federation, Karl Marx St., Bldg. 10, e-mail: danilaev@mail.ru).

PETRACHKOV Dmitry Nikolaevich — Candidate of Science (Eng.), Director, Steklo Research and Production Complex; Chief Designer. ORPE Technologiya named after A.G. Romashin (249030, Russian Federation, Obninsk, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: petrachkovdn@technologiya.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Чечин Д.Е., Данилаев М.П., Петрачков Д.Н. Обоснование требований к технологии формования элементов конструкций органического остекления методом горячего прессования. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 10, с. 105–114.

Please cite this article in English as:

Chechin D.E., Danilaev M.P., Petrachkov D.N. Justification of requirements to the process of organic glazing structural elements moulding using the pressure sintering. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 10, pp. 105–114.