

УДК 539.3

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ИОНОУПРОЧНЕННОГО ЛИСТОВОГО СТЕКЛА ПРИ ИЗГИБНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ

П. П. Гонтаровский,

канд. техн. наук

gontarpp@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8503-0959

Н. В. Сметанкина, д-р техн. наук

nsmetankina@ukr.net

ORCID: 0000-0001-9528-3741

С. В. Угримов, д-р техн. наук

sugrimov@ipmach.kharkov.ua

ORCID: 0000-0002-0846-4067

Н. Г. Гармаш, канд. техн. наук

garm.nataly@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4890-8152

И. И. Мележик, канд. техн. наук

melezhyk81@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8968-5581

Институт проблем машиностроения

им. А. Н. Подгорного

НАН Украины,

61046, Украина, г. Харьков,

ул. Пожарского, 2/10

Безопасность надежной эксплуатации летательных аппаратов и их долговечность существенным образом зависят от прочности остекления, которое является ответственным конструкционным элементом. К остеклению выдвигается целый ряд различных требований. Для обеспечения необходимых параметров широко используется высокопрочное силикатное стекло и применяются специальные технологии его упрочнения. Анализ проблемы показал, что недостаточная прочность элементов авиационного остекления и сложность методов контроля состояния стекла при производстве и эксплуатации вследствие наличия поверхностных дефектов микроскопических размеров, а также необходимость достоверной оценки остаточных напряжений нуждаются в применении новых подходов и технических решений для развития современных технологий создания конструкций. Ионный обмен является одним из механизмов упрочнения стекла, который позволяет уменьшить негативное влияние поверхностных дефектов за счет искусственного создания остаточных сжимающих напряжений и уменьшения толщины поврежденного слоя. Проведены расчетные исследования трещиностойкости ионоупрочненного листового стекла при изгибных деформациях с использованием собственного пакета программ, разработанного на основе метода конечных элементов и предназначенного для исследования термонапряженного состояния конструкций. Полученные результаты показали, что прочность разрушения реального листового стекла от растягивающих напряжений при изгибе определяется трещиноподобными поверхностными дефектами. Создание остаточных сжимающих напряжений на поверхности стекла путем ионообменного упрочнения обеспечивает приращение прочности при изгибе. При увеличении остаточных напряжений и глубины их распределения эффект от ионообменной обработки увеличивается. Если глубина зоны сжимающих напряжений от ионного упрочнения значительно меньше глубины поверхностной трещины, прочность стекла мало зависит от максимальных сжимающих напряжений на поверхности. Эффект от ионного упрочнения существенно возрастает в случае уменьшения глубины поверхностной трещины. Показана целесообразность проведения дальнейших исследований и сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными. Разработанная методика позволит решать важные практические задачи по исследованию прочности многослойного остекления летательных аппаратов и определению оптимальных методов устранения их дефектов.

Ключевые слова: летательные аппараты, силикатное стекло, напряженное состояние, прочность, остаточные напряжения, ионный обмен, дефекты поверхностного слоя.

Введение

Развитие отечественной авиационной техники требует усовершенствования применяемых материалов и конструкций стекла для кабин с целью обеспечения их безопасной и длительной эксплуатации [1, 2]. Актуальными проблемами повышения конкурентоспособности летательных аппаратов в настоящее время являются недостаточный ресурс остекления и необходимость уменьшения веса конструкции, а для военной авиации еще и повышение пулестойкости остекления. Остекление кабин летательных аппаратов должно выдерживать интенсивные эксплуатационные статические и динамические нагрузки [3, 4].

Статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Международная.

© П. П. Гонтаровский, Н. В. Сметанкина, С. В. Угримов, Н. Г. Гармаш, И. И. Мележик, 2021

Недостаточная прочность элементов авиационного стекла в значительной степени обусловлена поверхностными дефектами, а также сложностью методов контроля его состояния при производстве и эксплуатации. Поэтому возрастает необходимость внедрения новых уточненных подходов для анализа влияния поверхностных дефектов и механизмов упрочнения стекла на напряженно-деформированное состояние, развитие технологий упрочнения и контроля характеристик прочности структурных элементов и многослойных изделий в целом, создание новых технических решений на основе применения современных технологий упрочнения листового стекла, методов контроля ударной стойкости и повреждений.

Силикатное стекло, упрочненное по специальным технологиям, позволяет обеспечить необходимые прочностные параметры остекления, поэтому оно часто используется в авиационной технике. Вместе с тем, прочность силикатного стекла существенно зависит от наличия поверхностных дефектов, которые определяются способом производства, применяющимися при этом технологиями, условиями транспортировки и хранения. Наличие поверхностных дефектов микроскопических размеров в стекле, сложность методов их контроля приводит к неопределенности состояния поверхностного слоя, что в результате дает значительный разброс в значениях прочности стекла. Уменьшение негативного влияния поверхностных дефектов возможно за счет различных механизмов упрочнения стекла путем искусственного создания в нем остаточных сжимающих напряжений и уменьшения толщины поврежденного слоя.

Недостаточная прочность элементов авиационного остекления, сложность методов контроля поверхностных дефектов микроскопических размеров в стекле при производстве и эксплуатации, а также необходимость достоверной оценки влияния искусственно созданных остаточных напряжений на повышение прочности стекла нуждаются в разработке новых расчетных методик и технических решений для развития современных технологий создания конструкций.

Известно, что прочность стекла при растягивающих деформациях значительно меньше, чем при сжимающих, что вызвано наличием поверхностных трещин небольшого размера. Стекло – очень хрупкий материал, который разрушается из-за стресскивания без заметных пластических деформаций. Мерой трещиностойкости материала является величина коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} . Для обычного стекла она находится в пределах $0,4-0,7 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$, что в сто раз меньше, чем для стали. Это позволяет сделать вывод, что трещины даже очень малых размеров существенно снижают прочность стекла.

Микроскопические дефекты на поверхности стекла (микротрещины) есть даже в его исходном состоянии. Поверхностный слой с микротрещинами чаще всего обусловлен процессом изготовления. Он образуется при охлаждении флоат-стекла, прессовании деталей или вытягивании прутков и волокна. В условиях эксплуатационных нагрузок поверхностный слой меняется за счет модификации существующих дефектов и образования новых микротрещин [5, 6]. На рис. 1 приведен характерный вид микротрещин в реальном стекле [6]. Действие технологических и эксплуатационных факторов разного рода приводит к неравномерному характеру расположения дефектов, вследствие чего для технического стекла граница прочности при действии напряжений растяжения может колебаться в диапазоне от 10 до 3000 МПа.

Уменьшение дефектов поверхностного слоя с помощью механической обработки [7] и травления [8], а также создание остаточных напряжений сжатия, которые блокируют развитие дефектов в поверхностном слое за счет термической обработки и ионного обмена (ИО), являются эффективными методами повышения прочности стекла [9–12].

В настоящее время на практике все шире применяется метод химического упрочнения на основе ИО как альтернатива термическому упрочнению. Метод заключается в вытеснении ионов натрия ионами

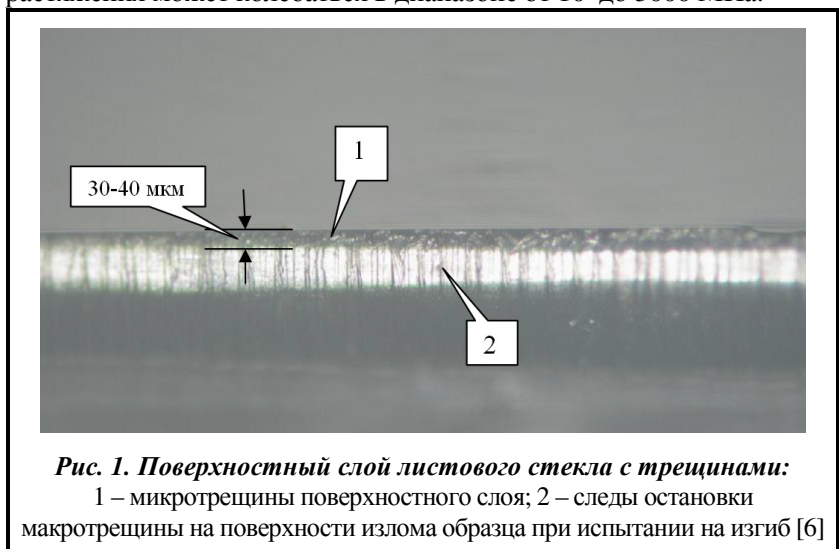


Рис. 1. Поверхностный слой листового стекла с трещинами:
1 – микротрещины поверхностного слоя; 2 – следы остановки макротрещины на поверхности излома образца при испытании на изгиб [6]

калия или лития в тонком поверхностном слое стекла и создании в этой зоне напряжений сжатия. На поверхности они принимают максимальные значения и быстро падают по толщине. Эти сжимающие остаточные напряжения закрывают поверхностные трещины путем контакта берегов [13, 14]. Характер распределения остаточных напряжений для ионного процесса упрочнения и характер для термического процесса значительно различаются, что приводит к разному уровню повышения прочности образцов и меняет характер разрушения стекла. Величина остаточных напряжений сжатия при применении ИО значительно

превышает аналогичные значения при термическом упрочнении, а глубина слоя с остаточными напряжениями сжатия значительно меньше. На рис. 2 приведено схематическое изображение распределения напряжений сжатия по толщине для упрочненного флоат-стекла с помощью термического и химического упрочнений [6]. Глубина слоя с остаточными напряжениями сжатия в закаленном стекле (сплошная параболическая кривая) составляет около 21% от толщины стекла. Глубина этого слоя для ИО-стекла (пунктирная линия) значительно меньше и в зависимости от режима упрочнения составляет 20–100 мкм. Максимальные остаточные напряжения растяжения во внутренних слоях термически упрочненного стекла составляют около 50% от максимального уровня напряжений сжатия на поверхности. В закаленном стекле они достигают 50–70 МПа, что приводит при разрушении конструктивных элементов к образованию мелких осколков и существенной потере несущей способности конструкций. Остаточные напряжения растяжения во внутренних слоях стекла, которые соответствуют остаточным напряжениям сжатия в поверхностных слоях для ИО-стекла, значительно меньше – около 20 МПа. Как следствие, при уровне предельных напряжений растяжения и изгиба, характерном для термически упрочненного стекла, фрагментация элементов из химически упрочненного стекла при их хрупком разрушении отличается значительно большим размером осколков, соизмеримых с аналогичными для элементов из неупрочненного флоат-скла. При локальной статической и ударной нагрузке твердыми телами характер разрушения поверхности ИО-стекла также приближен к неупрочненному стеклу, которое позволяет выполнять операции его разрезания и механической обработки элементов конструкций.

В стандарте ASTM C 1422–99 [15] классификация ИО-стекла проводится по двум независимым характеристикам: остаточные напряжения сжатия и глубина упрочненного слоя. В документе выделяются пять классов стекла по уровню напряжений (с остаточными напряжениями сжатия σ_{res} в диапазоне от 7 до 172 МПа для 1-го класса и $\sigma_{res} > 690$ МПа для 5-го класса) и шесть классов в зависимости от глубины упрочненного слоя (от величины меньше 50 мкм для класса А и больше 500 мкм для класса F).

Для определения предела прочности упрочненного стекла σ_s чаще всего используются два усредненных параметра: предел прочности стекла в исходном состоянии σ_0 и уровень остаточных напряжений сжатия σ_{res} [16]

$$\sigma_s = \sigma_0 + k\sigma_{res},$$

где k – эмпирический коэффициент, который в большинстве случаев определяется экспериментально.

Влияние ионного обмена на прочность стекла в зависимости от глубины и интенсивности создания остаточных напряжений исследовано недостаточно, поэтому вопросы ионного упрочнения стекла являются важными и актуальными.

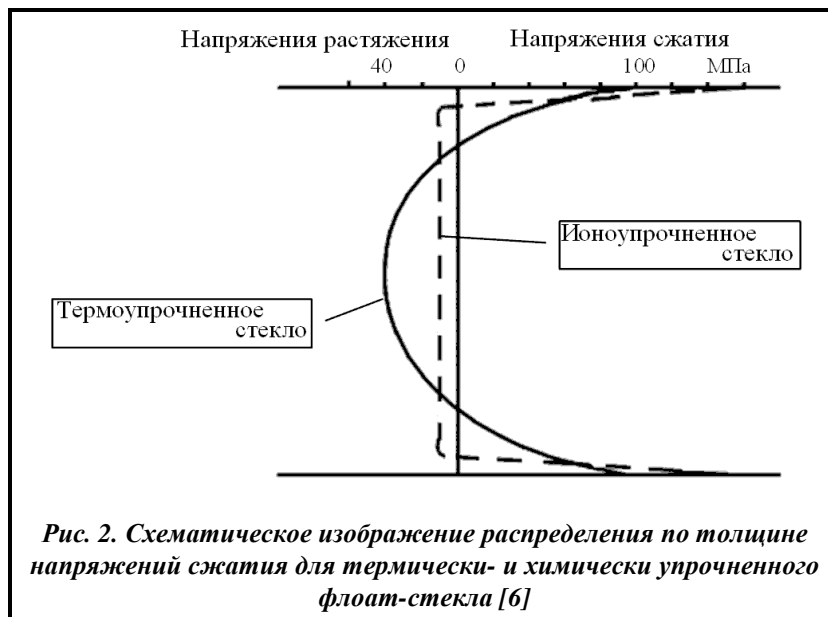


Рис. 2. Схематическое изображение распределения по толщине напряжений сжатия для термически- и химически упрочненного флоат-стекла [6]

Постановка задачі

В качестве примера рассмотрим образец из листового силикатного стекла толщиной 5 мм с наличием поверхностного дефекта и проведем исследование влияния ионного упрочнения на общее повышение прочности стекла.

Для малой поверхностной трещины глубиной a коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины можно вычислить по соотношению [17]

$$K_I = 1,99\sigma\sqrt{a}, \quad (1)$$

где σ – растягивающие напряжения.

Предположим, что неупрочненное силикатное стекло разрушается при напряжении 35,5 МПа, что практически совпадает со средним значением прочности силикатного стекла такой толщины. Для стекла при $K_{IC}=0,5$ МПа $\sqrt{м}$ критическая глубина поверхностной трещины, которая приводит к катастрофическому разрушению, равняется, согласно (1), 50 мкм.

Напряженно-деформированное состояние стекла при изгибе определяется с использованием результатов решения задачи теории упругости для случая плоской деформации [18]. Для моделирования методом конечных элементов трещиностойкости стекла, упрочненного ИО, в декартовой системе координат rOz выделим прямоугольную область $0 < r < 0,35$ мм, $-0,001$ мм $< z < 0,25$ мм. Поверхностная трещина с вершиной в точке B глубиной 50 мкм размещена вдоль оси r (рис. 3).

Нейтральная плоскость при изгибе листа описывается уравнением $r=0,25$ мм. Сторона области $z=0,25$ мм перемещается в направлении оси z вдоль прямой нормали к нейтральной плоскости: $u_z(0,25)=0$; $u_z(0)=0,0013 \times P$ (мм), где параметр нагружения P принимает значения 1, 2, 3. Характеристики материала стекла: удельный вес $\rho=2,52$ г/см³, модуль упругости $E=68$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,22$, коэффициент линейного температурного расширения $\alpha=1,14 \cdot 10^{-5}$, используемый для моделирования остаточных напряжений с помощью температурных деформаций $\varepsilon_T(r)=\alpha \cdot T(r)$.

На стороне $z=-0,001$ мм задаются граничные условия симметрии $u_z=0$; $\tau_{rz}=0$. Сжимающие напряжения величиной $\sigma_z = \frac{\alpha E T}{1-\nu} = 200$ МПа, являющиеся результатом ионного упрочнения поверхностного слоя, на глубине 30 мкм в точке A (рис. 3) падают до нуля, обеспечивая контактирование берегов поверхностной трещины. Отрезок OB на рисунке соответствует глубине начальной трещины, а OA – области действия сжимающих напряжений, в которой возможно частичное контактирование берегов трещины. Для моделирования этого явления в области OA вводятся 6 контактных элементов.

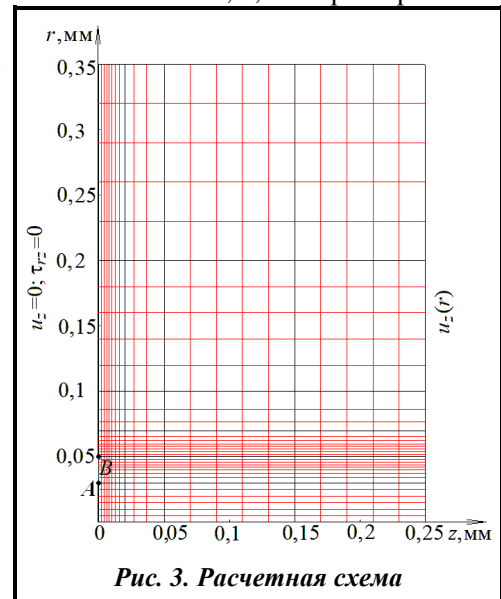


Рис. 3. Расчетная схема

Основные результаты исследований

В работе применяется упрощенное описание закономерности изменения сжимающих напряжений по толщине (рис. 4), поскольку в ионоупрочненном стекле толщина слоя, на которую распространяются эти напряжения, очень мала (30 мкм). Используются линейная (рис. 4, а) и билинейная (рис. 4, б) (приблизненно описывающая параболический закон распределения в области сжатия) аппроксимации.

При параметре нагружения $P=1$ изгибные напряжения σ_{bend} на поверхности неупрочненного стекла составляют примерно 35,5 МПа, при $P=2$ – $\sigma_{bend}=71$ МПа.

Дискретизация рассматриваемого образца на конечные элементы представлена на рис. 3, а в области трещины – на рис. 5. Размер конечных элементов в районе вершины трещины составляет 2 мкм. Коэффициент интенсивности напряжений можно оценить по соотношению [17]

$$K_{II} = \sigma_z \sqrt{2\pi r_i}, \quad (2)$$

где r_i – расстояние от вершины трещины до центров конечных элементов, которые находятся на продолжении трещины. При рассматриваемой дискретизации $r_i=1, 3, 5, 7, 9$ мкм.

На первых нескольких конечных элементах от вершины трещины наблюдается резкое уменьшение напряжений. Именно поэтому для вычисления коэффициента интенсивности напряжений на практике в расчетах используются результаты, полученные для третьего и четвертого конечных элементов от вершины трещины, при этом коэффициенты интенсивности напряжений усредняются [19].

В табл. 1 приведены результаты расчетов напряжений σ_{zi} , коэффициент интенсивности напряжений K_I , полученный по соотношению (2), а также величина полураскрытия трещины на поверхности в неупрочненном стекле (без ионного упрочнения стекла). Здесь $\sigma_{z1}, \sigma_{z2}, \sigma_{z3}, \sigma_{z4}$ – напряжения σ_z в 1–4 конечных элементах от вершины трещины (точка B). Результаты показывают, что для неупрочненного стекла коэффициент интенсивности напряжений K_I при $P=1$ несколько превышает значение $0,5 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$, которое принято как критическое предельное значение, что объясняется погрешностью вычислений метода конечных элементов. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что нагружение с параметром $P=1$ является практически наибольшим нагружением, которое может выдержать неупрочненное стекло.

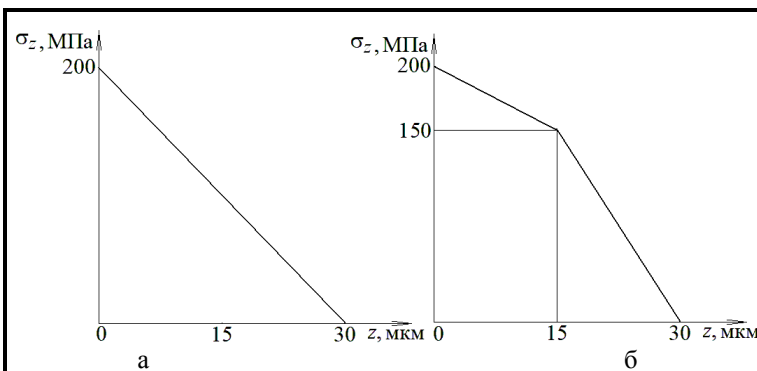


Рис. 4. Закономерность распределения остаточных напряжений:

а – линейное приближение; б – билинейное приближение

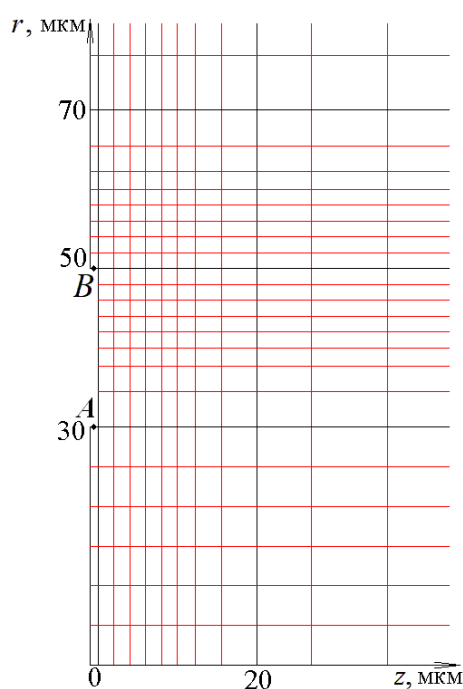


Рис. 5. Дискретизация области на конечные элементы в районе трещины

Таблица 1. Результаты расчетов для неупрочненного стекла

Параметр нагружения	σ_{z1} , МПа	σ_{z2} , МПа	σ_{z3} , МПа	σ_{z4} , МПа	K_I , МПа $\sqrt{\text{м}}$	Полураскрытие берегов на поверхности ($r=0$) u_z , мкм
$P=1$	258,4	115,8	91,5	77,8	0,514	0,0695
$P=2$	510,9	231,6	183	155,6	1,029	0,1391
$P=3$	775,3	347,4	274,5	233,4	1,543	0,2087

Для ионоупрочненного стекла результаты расчетов приведены в табл. 2. В числителе находятся значения, полученные для линейного закона распределения сжимающих напряжений при ионном упрочнении стекла, а в знаменателе – для билинейного. В шестом столбике таблицы приведен коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины, в седьмом – величина контактных сжимающих напряжений берегов трещины на поверхности $r=0$, в последнем столбце – размер зоны контакта берегов трещины.

Таблиця 2. Результати розрахунків для іоноупрочненого скла

Параметр навантаження	σ_{z1} , МПа	σ_{z2} , МПа	σ_{z3} , МПа	σ_{z4} , МПа	K_I , МПа $\sqrt{м}$	$\sigma_z (r=0)$, МПа	Контакт берегов тріщини
$P=1$	<u>118,8</u>	<u>56,5</u>	<u>49,1</u>	<u>44,8</u>	<u>0,271</u>	<u>-27,1</u>	$z < 24$ мкм
	110,6	53,1	46,6	42,9	0,244	-30,2	$z < 27$ мкм
$P=2$	<u>282,8</u>	<u>132,4</u>	<u>111,9</u>	<u>100,2</u>	<u>0,612</u>	<u>-17,3</u>	$z < 15$ мкм
	262,6	124,1	105,9	95,6	0,614	-21,3	$z < 20$ мкм
$P=3$	<u>497,1</u>	<u>229,4</u>	<u>189,9</u>	<u>167,5</u>	<u>1,087</u>	<u>0</u>	=
	439,4	205,2	172,5	154	0,994	-10,1	$z < 11$ мкм

Полученные результаты показывают, что при увеличении параметра нагруженности увеличивается коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины, а длина контактной зоны берегов трещины уменьшается. В случае линейного закона распределения сжимающих напряжений при $P=3$ контакт берегов трещины отсутствует. При билинейном законе распределения сжимающих напряжений зона контактирования берегов несколько больше, а коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины – меньше. Параметр нагружения, при котором коэффициент интенсивности напряжений достигает критического значения $K_I=K_{IC}=0,5$ МПа $\sqrt{м}$ в случае линейного закона распределения сжимающих напряжений, $P=1,65$, а билинейного – $P=1,7$.

При значении параметра нагруженности $P=3$ и линейном законе распределения сжимающих остаточных напряжений контакт берегов отсутствует, а полуоткрытие берегов на поверхности $u_z(0)=0,0684$ мкм. Таким образом, при ионном упрочнении берега трещины частично контактируют, а в случае отсутствия контакта раскрытие берегов трещины значительно уменьшается. Однако в ионоупрочненном стекле при глубине трещин 50 мкм его разрушение осуществляется раньше, чем достигается раскрытие берегов трещины на поверхности стекла.

Выводы

Проведены расчетные исследования трещиностойкости листового стекла, которое упрочнено ионным обменом, при изгибных деформациях с использованием пакета программ, разработанного в отделе вибрационных и термопрочностных исследований Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины с использованием метода конечных элементов для исследования термонапряженного состояния конструкций. Полученные результаты показали, что разрушение реального листового стекла от растягивающих напряжений при изгибе определяется поверхностными дефектами. При увеличении остаточных напряжений и глубины их распределения эффект от ионообменной обработки увеличивается. Глубина поверхностных трещин, исходя из реальной прочности листового стекла 35,7 МПа, достигает примерно 50 мкм, что превышает толщину слоя сжимающих напряжений, которые обеспечивают контакт берегов трещины. Если глубина зоны сжимающих напряжений от ионного упрочнения значительно меньше глубины поверхностной трещины, прочность стекла мало зависит от максимальных сжимающих напряжений на поверхности. Эффект от ионного упрочнения существенно возрастает в случае уменьшения глубины поверхностной трещины.

Поскольку при ионообменном упрочнении остаточные напряжения являются существенно неоднородными, реальные значения коэффициентов интенсивности K_{IC} для стекла имеют значительный разброс, полученные результаты требуют проведения дальнейших исследований и уточнения путем сравнения с экспериментальными данными.

Результаты данной статьи частично получены в рамках проекта Целевой программы научных исследований НАН Украины «Научно-технические проблемы мониторинга состояния, оценки и продления ресурса конструкций, оборудования и сооружений длительной эксплуатации» (Программа Ресурс-3).

Литература

1. Сметанкіна Н. В., Угримов С. В. Аналіз міцності багатошарового оскління літальних апаратів при високошвидкісному ударному навантаженні. *Прикл. питання мат. моделювання*. 2019. Т. 2. № 1. С. 112–122.
2. Rodichev Y. M., Smetankina N. V., Shupikov O. M., Ugrimov S. V. Stress-strain assessment for laminated aircraft cockpit windows at static and dynamic load. *Strength Materials*. 2018. Vol. 50. No. 6. P. 868–873. <https://doi.org/10.1007/s11223-019-00033-4>.

3. Сметанкіна Н. В., Угрімов С. В., Шупіков О. М. Моделювання відгуку багат шарового оскління на статичне і динамічне навантаження. *Вісн. Харк. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна*. Сер. Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. 2015. Вип. 27. С. 150–156.
4. Сметанкіна Н. В., Шупіков О. М., Угрімов С. В. Математичне моделювання процесу нестационарного деформування багат шарового оскління при розподілених та локалізованих силових навантаженнях. *Вісн. Херсон. нац. техн. ун-та*. 2016. Вип. 3(58). С. 408–413.
5. Veer F. A., Rodichev Yu. M. Glass failure, science fiction, science fact and hypothesis. *Glass Performance Days: 11th Intern.l Conf. on Architectural and Automotive Glass*. Tampere, Finland. 12–15 June 2009. P. 819–823.
6. Mognato E., Schiavonato M., Barbieri A., Pittoni M. Process influences on mechanical strength of chemical strengthened glass. *Glass Structures and Eng.* 2016. Vol. 1. No. 1. P. 247–260. <https://doi.org/10.1007/s40940-016-0019-0>
7. Bos F. The integrated approach to structural glass safety applied to glass beams. *Challenging Glass 2: Conf. on Architectural and Structural Appl. Glass*. Delft, Nederland. 20–21 May 2010. P. 297–308. <https://doi.org/10.7480/cgc.2.2415>.
8. Баргенов Г. М. Сверхпрочные и высокопрочные неорганические стекла. М.: Стройиздат, 1974. 240 с.
9. Rodichev Y., Veer F., Soroka O., Shabetya O. Structural strength of heat-strengthened glass. *Strength Materials*. 2018. Vol. 50. Iss. 4. P. 584–596. <https://doi.org/10.1007/s11223-018-0004-8>.
10. Veer F. A., Rodichev Y. M. Improving the engineering strength of heat strengthened glass. *Heron*. 2017. Vol. 61. No. 2. P. 121–138.
11. Mazzoldi P., Carturan S., Quaranta A., Sada C., Sglavo V. M. Ion exchange process: history, evolution and applications. *Rivista del nuovo cemento*. 2013. Vol. 36. No. 9. P. 397–450. <https://doi.org/10.1393/ncr/i2013-10092-1>.
12. Sglavo V. M. Chemical strengthening of soda lime silicate float glass: effect of small differences in the KNO₃ bath. *Intern. J. Appl. Glass Sci.* 2015. Vol. 6. No. 1. P. 73–82. <https://doi.org/10.1111/ijag.12101>.
13. Бутаев А. М. Прочность стекла. Ионнообменное упрочнение. Махачкала, 1997. 130 с.
14. Баргенов М. Строение и механические свойства неорганических стекол. М.: Изд-во лит. по стр-ву, 1966. 216 с.
15. ASTM C1422-99. Standard specification for chemically strengthened flat glass. West Conshohocken, PA, 1999. 3 p.
16. Schiavonato M., Mognato E., Redner A. S. Stress measurement, fragmentation and mechanical strength. *Glass Proc. Days: 9th Intern. Conf. on Architectural and Automotive Glass*. Tampere, Finland. 17–20 June 2005. P. 92–95.
17. Броек Д. Основы механики разрушения. М.: Высш. шк., 1980. 386 с.
18. Shulzhenko N., Gontarovskiy P., Garmash N., Melezhik I. Design forecasting of thermal strength and resource of steam turbine structural components. *J. Mech. Eng. – Problemy Mashynobuduvannia*. 2018. Vol. 21. No. 3. P. 38–46. <https://doi.org/10.15407/pmach2018.03.038>.
19. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Протасова Т. В. Применение полуаналитического метода конечных элементов для решения трехмерных задач термомеханики в цилиндрических координатах. *Вестн. НТУ «ХПИ»*. Динамика и прочность машин: Темат. вып. 2005. Вып. 20. С. 151–160.

Поступила в редакцию 26.07.2021

Чисельні дослідження тріщиностійкості іонозміцненого листового скла при згинних деформаціях

П. П. Гонтаровський, Н. В. Сметанкіна, С. В. Угрімов, Н. Г. Гармаш, І. І. Мележик

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України,
61046, Україна, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10

Безпека надійної експлуатації літальних апаратів і їх довговічність істотно залежать від міцності скління, яке є відповідальним конструкційним елементом. До скління висувається цілий ряд різних вимог. Для забезпечення необхідних параметрів широко використовується високоміцне силікатне скло та застосовуються спеціальні технології його зміцнення. Аналіз проблеми показав, що недостатня міцність елементів авіаційного скління й складність методів контролю стану скла при виробництві й експлуатації внаслідок наявності поверхневих дефектів мікроскопічних розмірів, а також необхідність достовірної оцінки залишкових напружень потребують застосування нових підходів і технічних рішень для розвитку сучасних технологій створення конструкцій. Іонний обмін є одним з механізмів зміцнення скла, який дозволяє зменшити негативний вплив поверхневих дефектів за рахунок штучного створення залишкових стискаючих напружень і зменшення товщини ушкодженого

шару. Проведено розрахункові дослідження тріщиностійкості іонозміцненого листового скла при згинних деформаціях із застосуванням власного пакета програм, розробленого на основі методу скінченних елементів та призначеного для дослідження термонапруженого стану конструкцій. Отримані результати показали, що міцність руйнування реального листового скла від розтягуючих напружень при згині визначається тріщиноподібними поверхневими дефектами. Створення залишкових стискаючих напружень на поверхні скла шляхом іонообмінного зміцнення забезпечує збільшення міцності при згинанні. При зростанні залишкових напружень та глибини їх розподілу ефект від іонообмінної обробки збільшується. Якщо глибина зони стискаючих напружень від іонного зміцнення значно менше глибини поверхневої тріщини, міцність скла мало залежить від максимальних стискаючих напружень на поверхні. Ефект від іонного зміцнення суттєво зростає у випадку зменшення глибини поверхневої тріщини. Показана доцільність проведення подальших досліджень і порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними. Розроблена методика дозволить розв'язувати важливі практичні задачі дослідження міцності багатошарового скління літальних апаратів і визначення оптимальних методів усунення їх дефектів.

Ключові слова: літальні апарати, силікатне скло, напружений стан, міцність, залишкові напруження, іонний обмін, дефекти поверхневого шару.