

4. Yu F., Ortiz-Longo C.R., White K.W., Hunn D.L. The microstructural characterization of in-situ grown Si_3N_4 whisker-reinforced barium aluminum silicate ceramic matrix composite //Jornal of materials scirnсе. 1999. №34. P. 2821–2835.
5. Павлушкин Н.М., Сентюрин Г.Г., Хадаковская Р.Я. Практикум по технологии стекла и ситаллов. М. 1970.
6. Эмануэль Н.М., Кузьмин М.Г. Экспериментальные методы химической кинетики. М.: Изд-во МГУ, 1985.

УДК 620.193.2

В.С. Ерасов, Е.А. Котова

ЭРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТВЕРДЫХ (ПЫЛЕВЫХ) ЧАСТИЦ

В процессе эксплуатации авиационной техники в условиях запыленности воздуха детали летательных аппаратов подвергаются эрозии. Эрозионное воздействие твердых (пылевых) частиц наиболее опасно для лопаток винтовентиляторов и компрессоров двигателей, лопастей вертолетов, винтов самолетов, обшивок фюзеляжа и других деталей. Проанализировано влияние факторов эрозионного воздействия и физико-механических свойств материалов на их эрозионную стойкость. Рассмотрены возможные механизмы и типы эрозионного разрушения. Обозначены основные проблемы при изучении эрозионной стойкости материалов к воздействию твердых частиц.

Ключевые слова: *твердые частицы, эрозионное воздействие, параметры соударения, механизм эрозии, тип разрушения, эрозионная стойкость, эрозионные испытания.*

Рост скоростей полетов летательных аппаратов (ЛА), их эксплуатация в условиях воздействия твердых частиц (попадание в пылевые бури, полеты в пустынях, взлет и посадка с грунтовых аэродромов) предъявляют требования к эрозионной стойкости материалов, используемых в различных деталях ЛА. Эрозионные испытания необходимы для оценки качества новых конструкционных материалов и принятия конструктивных решений при применении таких материалов в ЛА.

При эксплуатации авиационной техники в наибольшей степени проявляется эрозионное воздействие на материалы твердых частиц. Оно наиболее опасно для лопаток винтовентиляторов и компрессоров двигателей, лопастей вертолетов и винтов самолетов, антенных обтекателей, воздухозаборников, обшивок фюзеляжа самолетов и вертолетов и других деталей.

Существует два основных направления, по которым ведутся работы по защите элементов конструкций ЛА от эрозионных повреждений. Первое – конструкторское направление: не допустить (уменьшить) попадание частиц на поверхность материала путем постановки экранов и использования пылезащитных устройств. Второе – материаловедческое направление: создание более эрозионностойких материалов и защитных покрытий.

К параметрам эрозионного воздействия при эксплуатации ЛА относят внешние факторы, воздействующие на материал: частицы, которые по составу и дисперсности идентичны с частицами почвы вблизи аэродромов; концентрация частиц (запыленность); скорость и угол соударения материалов ЛА с частицами; продолжительность

эрозионного изнашивания материалов (продолжительность соударения материалов ЛА с частицами).

Дисперсный и минералогический состав пыли оказывает влияние на эрозионную стойкость материалов. Результаты анализа проб грунтовой пыли показали, что размер частиц d_s , вызывающих эрозию материалов при полете ЛА, лежит в интервале от 50 до 300 мкм, а основным минералом в составе пыли является кварц. Запыленность воздуха ρ_n составляет от 0,1 до 10 мг/м³ и выше, но доля крупных кварцевых частиц не превышает 1 мг/м³. Скорости соударения материалов с частицами v колеблются от 50 до 500 м/с. Углы соударения α определяются видом детали и составляют от 5 до 90 град [1, 2].

В настоящее время существует ряд методик для исследования эрозионных показателей авиационных материалов при воздействии твердых частиц на установках аэродинамического типа (ASTM G 76-04, РТМ 1.2.046–84), центробежного типа (РТМ 1.2.168–2001) и с помощью центробежного ускорителя (ГОСТ 23.201–84). К сожалению, имеющиеся результаты исследований эрозионной стойкости материалов, полученные на различных эрозионных установках по существующим методикам испытаний, противоречивы и трудно сопоставимы. Причиной этого является отсутствие данных по основным параметрам экспериментов (скорости соударения и удельного массового прихода частиц на образец) и единого критерия оценки материалов. Это снижает достоверность и ценность полученных эрозионных характеристик материалов и приводит к некорректным рекомендациям по их применению в различных деталях ЛА.

Все это требует проведения дальнейших исследований эрозионного изнашивания материалов и разработки единой методики испытаний, позволяющей определять и контролировать параметры соударения частиц с поверхностью деталей ЛА. Разработка единой методики испытаний повысит точность эрозионного эксперимента и позволит корректно сопоставлять результаты, полученные на различных установках, а также рассчитывать работоспособность деталей ЛА с учетом эрозионного воздействия твердых частиц при эксплуатации. Интересными для разработки методов эрозионных испытаний могут оказаться испытания с помощью вибраторов (электродинамических испытательных установок), позволяющих получать высокие значения скоростей соударения (от 50 м/с), используя простое устройство ячейки для крепления образцов.

Однако параметры эрозионного эксперимента не исчерпывают всей совокупности факторов, влияющих на эрозионную стойкость материалов. В ряде исследовательских работ [1–3] приводятся зависимости эрозионных показателей от других механических характеристик. Твердость материала является наиболее часто встречающейся в литературе характеристикой, от которой зависит эрозионная стойкость материалов. Предложено множество полуэмпирических моделей влияния характеристик материалов на их ресурс работоспособности при эрозионном воздействии. Во всех предложенных моделях процесс разрушения поверхностного слоя описывается статической механикой разрушения, согласно которой источниками повреждаемости являются концентраторы и дефекты, расположенные на поверхности материала, что не учитывает всех особенностей разрушения различных по природе материалов [1].

В общем случае механика столкновения частицы с преградой представляет собой взаимосвязанную последовательность деформаций как преграды, так и частицы. Высокая скорость нагружения, малость как самого нагружаемого объема, так и продолжительности нагружения делают эту задачу не только многомерной, но и принципиально отличной от классических задач статической прочности или механики сплошной среды. Возможно, именно этим объясняется отсутствие явной связи интенсивности эрозионного разрушения с любым известным параметром теории упругости и пластичности [2].

Эрозия материалов происходит при многократных ударах частиц. Простое рассмотрение эффектов, связанных с потоком частиц, падающих на поверхность в течение некоторого промежутка времени, позволяет предположить, что к основной проблеме добавляется много новых и сложных проблем. Они, в частности, включают в себя соударения частиц внутри набегающего потока, широкий диапазон углов падения в заданный момент времени, дробление частиц, экранирование поверхности отскакивающими частицами и, как следствие, внедрение частиц в материал и поверхностное повреждение вследствие многократных ударов [2].

Изучая основные закономерности эрозионного износа, можно заключить, что скорость и угол соударения частиц с материалом оказывают наибольшее влияние на эрозионную стойкость материалов [1].

Большинство исследователей установили, что зависимость эрозионных потерь I материалов при соударении с твердыми (пылевыми) частицами от скорости соударения v выражается степенной функцией (см. формулу), при этом показатель степени n колеблется от 2 до 3. Для пластмасс n колеблется от 2,2 до 4,2; для ЛКП – может достигать 4,5; для резин – от 2,7 до 5,1 [1].

$$I = A \cdot v^n,$$

где A – постоянная величина, характеризующая эрозионную стойкость материала.

Угол соударения, соответствующий максимуму интенсивности изнашивания, не является константой материала, а зависит от скорости соударения, размеров и формы частиц.

Для пластичных материалов максимальная скорость эрозии достигается при углах соударения 20–60 град. Хрупкая эрозия, типичная для ПКМ, характеризуется возрастанием скорости эрозии с увеличением угла соударения. При этом максимального значения она достигает при угле соударения 80–90 град. Можно предположить, что в этом случае механизм эрозии связан с усталостью поверхности образца, зависящей от нормальной составляющей силы удара частицы, приводящей к образованию трещин и выкрашиванию участков поверхности образца.

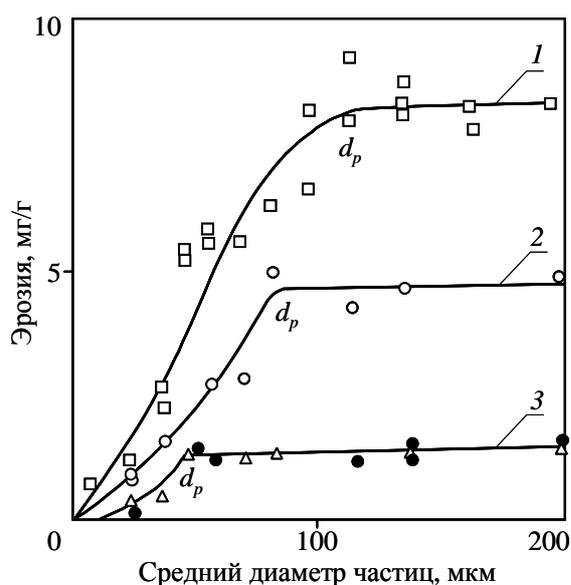


Рис. 1. Влияние размера частиц на эрозию 11%-ной хромистой стали при ударе под углом 90 (□, ○, △) и 20 град (●) со скоростью соударения 305 (1), 244 (2) и 128 м/с (3); d_p – предельный размер частиц, с увеличением которого эрозионный ресурс остается постоянным [2]

Размер и форма воздействующих частиц оказывают существенное влияние на эрозионную стойкость материалов. С увеличением размера частиц эрозия растет, но до определенного предела. Начиная с некоторого размера, эрозионный износ становится постоянным, т. е. увеличение размера частиц не оказывает влияния на эрозию (рис. 1). Это может быть связано с дроблением частиц о поверхность металлов или внедрением частиц в поверхность ПКМ или эластомеров при высоких скоростях соударения [1, 2].

Форма частицы и ее ориентация при контакте являются важными параметрами наряду со скоростью частицы, углом падения и свойствами материала частицы. Влияние формы частиц на эрозионную стойкость материалов существенно для ма-

лых скоростей соударения. Для хрупких материалов эрозия протекает более эффективно при воздействии частиц с острыми гранями. При изучении ударного воздействия острых частиц был обнаружен процесс микрорезания. Результаты зависят от угла скола частицы и угла падения, а также от размера, до которого произошло дробление частицы [2, 4].

На эрозионную стойкость материалов оказывают влияние плотность и твердость соударяющихся материалов. Как правило, чем выше плотность и твердость материала преграды и ниже плотность и твердость абразивных частиц, тем выше показатель эрозионной стойкости материалов.

Все исследования по влиянию скорости соударения материалов с частицами на эрозионную стойкость материалов проведены при условии $\rho_m < \rho_s$ и $H_m < H_s$, где ρ_m , H_m – плотность и твердость изнашиваемого материала соответственно; ρ_s , H_s – плотность и твердость частицы соответственно. Для области значений $\rho_m > \rho_s$ и $H_m > H_s$ систематизированные данные отсутствуют [1, 2]. По данным работы [2], влияние твердости частиц исследовалось лишь в ограниченном числе работ. Интерпретация полученных результатов оказалась затруднительной из-за необходимости более подробно характеризовать частицы до эрозии и после нее.

Увеличение запыленности и удельного массового прихода частиц снижают эрозионную стойкость материалов [2, 4].

При изучении эрозионного изнашивания металлов и сплавов было обнаружено, что внедрение в поверхностные слои металлического материала ударяющихся частиц может вызвать существенное локальное повышение температуры. Разогрев материала происходит до глубин не более 5 мкм. С увеличением скорости соударения разогрев металлических материалов увеличивается. Факт локального повышения температуры металлов и сплавов при соударении с частицами необходимо учитывать при объяснении механизмов эрозионного изнашивания [5].

Усталостный механизм эрозии материалов рассмотрен в работе [6]. В соответствии с ним поверхностное повреждение, разрушение и отделение материала твердого тела происходят в результате усталости материала в его поверхностных слоях, вызванной многократными ударами частиц. Существование усталостного механизма подтверждает качественное совпадение порядка металлов в ряду эрозионной стойкости с расположением их кривых усталости.

В работе [7] предложен усталостно-энергетический критерий – удельная энергия разрушения металлов, определяемая как площадь под кривой растяжения при статических испытаниях, которая коррелирует с эрозионной стойкостью металлов.

Таким образом, при оценке общей картины эрозионного процесса следует учитывать сложный комплексный характер этого вида изнашивания при ударе. Механизм и основные закономерности изнашивания при ударе определяются рядом факторов: энергией удара; состоянием поверхности изнашивания; твердостью абразивной частицы; упругим и пластическим деформированием поверхностного слоя материала с последующим развитием в нем соответствующих температурных изменений; развитием усталостных явлений и др.

Ударное разрушение изучалось для широкого класса материалов. При исследованиях были выявлены два основных режима хрупкого ударного разрушения. Разрушение сравнительно твердых материалов (ZnS) под действием удара сильно деформируемых частиц (нейлон) проявляется главным образом в виде коротких концентрических трещин на поверхности материала (рис. 2). Этот тип разрушения часто сопровождается поверхност-

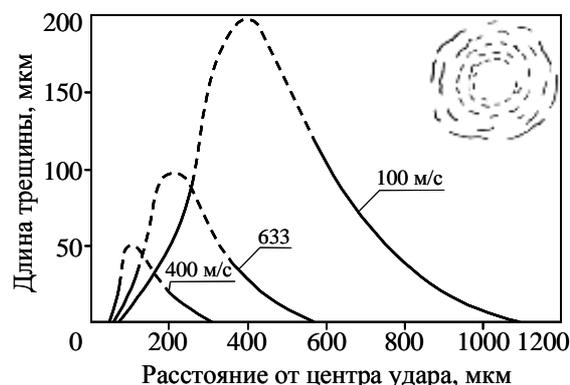


Рис. 2. Длина трещины в зависимости от расстояния от центра удара нейлоновыми сферическими частицами $\varnothing 500$ мкм о преграду из ZnS при различных скоростях соударения (—); ---- режим взаимодействия трещин [2]

ным откалыванием. Трещины образуются вокруг центральной неповрежденной зоны, где при ударе действуют напряжения сжатия. В зоне действия напряжений растяжения (вокруг неповрежденной зоны) число трещин сначала быстро возрастает до максимума, а затем постепенно уменьшается до нуля при приближении к внешней границе области разрушения. Длина и глубина остановившихся трещин сначала возрастают при удалении от внутренней границы зоны разрушения, а затем уменьшаются [2].

Совершенно другой характер разрушения материала наблюдается под действием удара сравнительно твердых частиц (WC). В этом случае внедрение частицы в преграду из ZnS сопровождается интенсивным хрупким разрушением (рис. 3). Такой режим разрушения получил название «режим упругопластического поведения». Однако не было доказано, что для возникновения этого режима разрушения преграда должна быть пластичной.

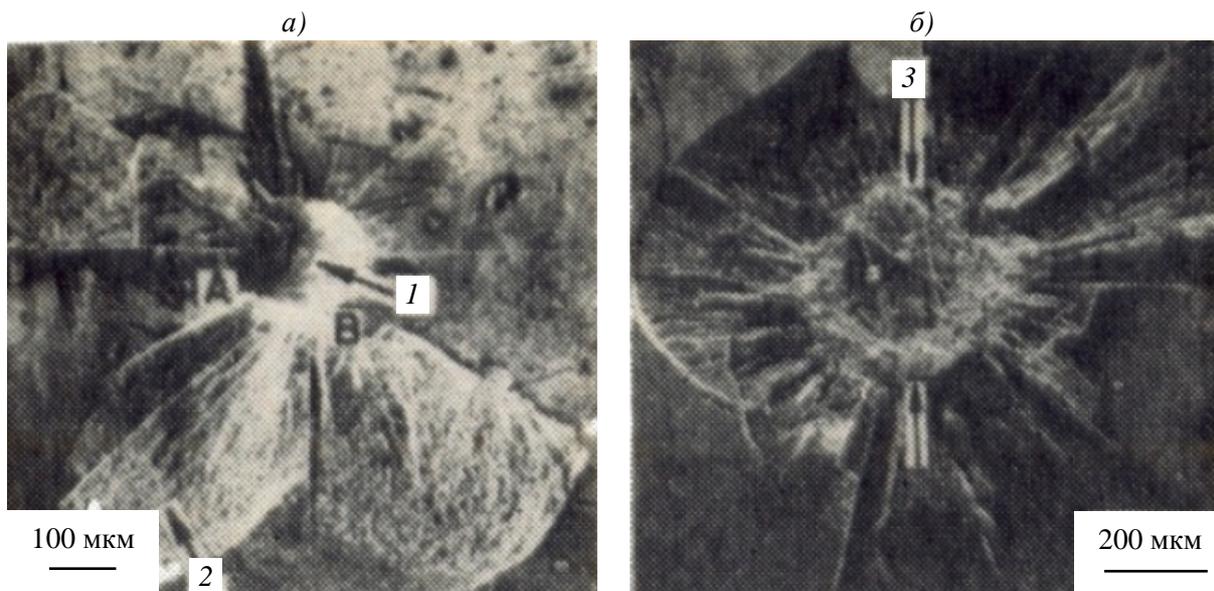


Рис. 3. Пластическое проникание частиц WC в преграду из ZnS при скорости соударения 130 (а) и 230 м/с (б) [2]:

1 – пластический отпечаток; 2 – поперечная трещина; 3 – приблизительный диаметр зоны контакта

При оценке свойств металлов, связанных с изменением скорости деформации при ударе, необходимо учитывать поведение металла в процессе самой деформации, а также свойства материала после деформации. При импульсных процессах необходимо учитывать ударную вязкость, по которой можно определить состояние металла и характер его разрушения.

Определение вязкости материала, основанное на обработке экспериментальных зависимостей сопротивления деформированию от скорости деформации, полученных при испытании образцов на растяжение–сжатие, дает возможность изучить зависимость вязкости от состояния материала (структурного и фазового состава) и скорости пластической деформации.

Структура, сформировавшаяся в процессе деформации, зависит от скорости деформации и температуры. Пластичные материалы, которые с понижением температуры становятся хрупкими, ведут себя так же при переходе от статической нагрузки к импульсной. Очевидно, материалы, хрупкие при статических нагрузках, остаются хрупкими и при импульсных нагрузках. [8].

Для понимания эрозии пластичных материалов одним из параметров материала, представляющим особый интерес, является твердость на вдавливание. Для определения

связи между твердостью и скоростью эрозии были проведены многочисленные исследования – на рис. 4 приведены некоторые результаты этих исследований [2]. Очевидно, что скорость эрозии различных пластичных материалов обратно пропорциональна твердости материала. Однако при изучении влияния изменения твердости конструкционной стали 1045 и электротехнической стали 1213 было обнаружено слабое влияние изменения твердости на скорость эрозии. Исследовались и другие отличительные характеристики материалов, такие как кристаллическая структура, системы скольжения, напряжение пластического течения и чувствительность к скорости изменения относительной деформации, которые, по-видимому, являются определяющими параметрами. В работе [2] сделано предположение, что более подходящей характеристикой является твердость на вдавливание материалов с упрочненной поверхностью.

Анализ рассмотренных работ позволил выявить следующие задачи, решение которых необходимо для более глубоких исследований эрозионной стойкости авиационных материалов к воздействию твердых частиц:

- уточнение значений основных параметров эрозионного процесса – необходимо точное измерение определяющих параметров эрозионных испытаний (скорости частицы или диапазона скоростей частиц, угла падения частицы или диапазона углов падения частиц, удельного массового прихода частиц на образец, эффекта отражения и эффекта дробления частиц при ударе);

- определение зависимости эрозионных потерь материала не только от скорости соударения материалов с частицами, но и от других параметров эрозионных экспериментов;

- влияние размера частиц на скорость эрозии – следует изучить распределение частиц по размерам до эрозии и после нее;

- определение влияния внедренных частиц (или осколков) на процесс эрозии; исследование влияния внедренных частиц (или осколков) при эрозии – принимая во внимание, что в некоторых системах в результате внедрения или прилипания материала падающих частиц создается определенный уровень защиты;

- изучение процессов деформации и разрушения, протекающих при соударениях частиц с металлами; определение формы и размеров продуктов процесса эрозии, разработка моделей, позволяющих описать процессы эрозии.

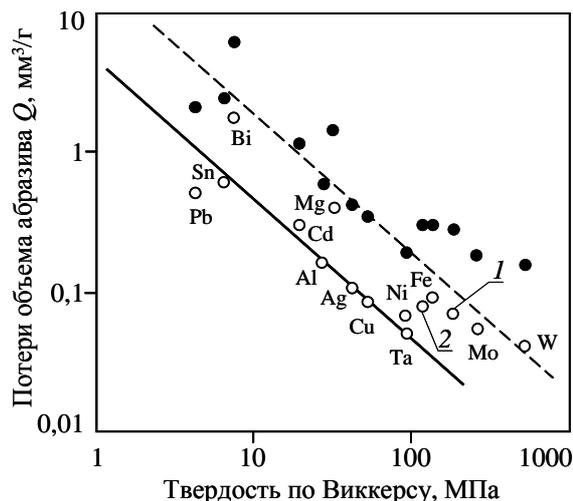


Рис. 4. Потери объема абразива в зависимости от твердости (по Виккерсу) металлов при угле падения частиц $\alpha=20$ град и скоростях удара 76 (○) и 137 м/с (●) (все металлы, за исключением кадмия, были в отожженном состоянии) [2]:

1 – сталь марки 1045; 2 – сталь марки 1213

ЛИТЕРАТУРА

1. Боркова А.Н. Эрозионная стойкость авиационных материалов при соударении с твердыми (пылевыми) частицами: автореф. дис. канд. техн. наук. М. 2006. 27 с.
2. Эрозия /Под ред. К. Прис. Пер. с англ. М.: Мир. 1982. 464 с.
3. Клейс И.Р. Некоторые исследования по абразивной эрозии: автореф. дис. докт. техн. наук. М. 1970. 21 с.

4. Крамченков Е.М. Исследование эрозионного изнашивания материалов: автореф. дис. канд. техн. наук. М. 1996. 26 с.
5. Урбанович Л.И., Крамченков Е.М., Чуносос Ю.Н. Разогрев твердого тела в зоне удара эродирующей твердой частицы //Трение и износ. 1994. Т. 15. №6. С. 965–972.
6. Кондрашов Э.К. Эрозионностойкие лакокрасочные покрытия. М.: Химия. 1989. 136 с.
7. Бодрышев В.В. Удельная энергия разрушения как определяющий параметр эрозионной стойкости материала //Известия вузов. 1978. №2. С. 133–137.
8. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Албагачиев А.Ю. Изнашивание при ударе. М.: Машиностроение. 1982. 192 с.

УДК 669.715+678.034

В.В. Антипов, О.Г. Сенаторова, В.В. Сидельников

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРОСТОЙКОСТИ СЛОИСТЫХ ГИБРИДНЫХ АЛЮМОСТЕКЛОПЛАСТИКОВ КЛАССА СИАЛ

Приведены результаты испытаний на пожаростойкость (сопротивление распространению пламени) слоистых алюмокомпозитов класса СИАЛ различной структуры и состава (прежде всего на базе листов Al–Li сплава 1441). Испытания образцов с размером рабочей зоны 200×200 мм на лабораторных установках при воздействии пламени газовой горелки показали, что СИАЛы позволяют (по сравнению с монолитными листами из алюминиевых сплавов) на порядок (с ~1,5 до 15 мин при 1100°С) увеличить время сопротивления распространению пламени, сохранить жесткость конструкции и тем самым увеличить время эвакуации пассажиров из самолета. Установлен механизм противодействия разрушению СИАЛов при воздействии пламени. Результаты испытаний также показали, что СИАЛы (GLARE) возможно использовать в качестве пожаростойких перегородок.

Ключевые слова: *пламя, температура, продолжительность прогорания, газовая горелка.*

СИАЛы (Стеклопластик **И** АЛюминий) – класс перспективных конструктивных слоистых гибридных материалов, состоящих из тонких (0,3–0,5 мм) листов алюминиевых конструктивных сплавов (Al–Li сплава пониженной плотности 1441, дуралюминов 1163, Д16ч., высокопрочных сплавов В95п.ч./о.ч.) и прослоек (0,2–0,5 мм) пластика на основе клеевых препрегов, армированных высокопрочными стеклонеполнителями. Зарубежным аналогом является материал GLARE (GL – стекло, А – алюминий, RE – армирование), который эффективно использован в качестве обшивки фюзеляжа самого большого самолета А-380 компании «Airbus» [1, 2].

СИАЛы имеют преимущества по сравнению с монолитными алюминиевыми листами: высокую трещиностойкость (на порядок выше сопротивление росту трещины усталости: $<0,3$ мм/цикл при $\Delta K=31$ МПа $\sqrt{м}$), пониженную плотность (2,35–2,5 г/см³) – на 10–15%, высокую прочность ($\sigma_b >600$ МПа), обладают уникальным комплексом других характеристик – высокими пожаростойкостью, коррозионной стойкостью и ударостойкостью. В результате повышаются живучесть, ресурс и весовая эффективность конструкций [1, 4].