

Испытания на адгезию герметизирующих и заливочных материалов к алюминиевым поверхностям

В последние недели неоднократно обсуждался вопрос выбора оптимальной подготовки поверхности для обеспечения максимальной адгезии. При этом на сегодняшний день отсутствуют количественные данные о фактической прочности сцепления используемых материалов с различными типами алюминиевых поверхностей, а также результаты сравнительных испытаний, которые могли бы служить объективной основой для принятия технических решений.

Поскольку подобные испытания ранее не проводились, я решил провести серию сравнительных тестов, чтобы заменить предположения объективными экспериментальными данными.

Целью испытаний являлось сравнение адгезии материалов, применяемых в серийном производстве, к двум типам алюминиевых поверхностей:

- алюминиевая плита с пескоструйной обработкой поверхности, применяемая в производстве UVSS 2.5;
- алюминиевая плита с поверхностью после механической обработки на CNC без дополнительной подготовки, используемая в UVSS 2.9.

Для проведения испытаний были приобретены электронные весы с функцией Peak & Hold (фиксация максимального усилия), а также одинаковые испытательные площадки из нержавеющей стали размером 30 × 35 мм с центральным полукольцом, обеспечивающим равномерное распределение нагрузки при отрыве.

Для приложения нагрузки использовался домкрат, позволяющий плавно и равномерно увеличивать усилие без ударных нагрузок. Усилие прикладывалось строго по центру испытательной площадки, что обеспечивало одинаковые условия проведения испытаний.

В испытаниях использовались три материала, применяемые в серийном производстве:

- DOWSIL 7091 Silicone Sealant (Black);
- 832FX Black Flexible Epoxy Compound;
- RTV12A Clear Silicone Compound.

Далее по тексту для краткости они будут обозначаться как силикон, чёрный компаунд и прозрачный компаунд соответственно.

Дополнительно была проведена оценка влияния праймера на прочность адгезионного соединения. Для каждого материала испытания выполнялись в двух вариантах подготовки поверхности:

- обезжиривание поверхности спиртом;
- обезжиривание поверхности с последующим нанесением праймера.

Для расчёта адгезии использовалась формула

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

где:

- σ — прочность адгезии (МПа),
- F — сила отрыва (Н),
- A — площадь склеивания (мм²).

Площадь склеивания - 30×35=1050 мм²

1 кг приложенного усилия на отрыв = 9.80665 Н

Результаты получились следующими:

Гладкий алюминий без пескоструйной обработки	Сила отрыва, кг	Адгезия, МПа
Силикон без праймера	35.5	0.332
Силикон с праймером	35.3	0.33
Прозрачный компаунд без праймера	13.45	0.126
Прозрачный компаунд с праймером	16.95	0.158
Чёрный компаунд без праймера	213	1.989
Чёрный компаунд с праймером	272.1	2.542

Алюминий с пескоструйной обработкой	Сила отрыва, кг	Адгезия, МПа
Силикон без праймера	36.85	0.344
Силикон с праймером	37.35	0.349
Прозрачный компаунд без праймера	14.65	0.137
Прозрачный компаунд с праймером	18.5	0.173
Чёрный компаунд без праймера	220.6	2.06
Чёрный компаунд с праймером	206	1.924

Далее результаты представлены не только в абсолютных значениях, но и в виде относительного изменения (в процентах), что позволяет более наглядно сравнить влияние различных факторов. Кроме того, для каждого испытания приведены фотографии разрушения образцов, поскольку визуальный характер отрыва не всегда напрямую отражает измеренное значение адгезии.

1. Силикон

Все образцы выдерживались перед испытаниями более 36 часов. Однако в случае силикона полное отверждение за это время не произошло. Материал полимеризовался только по периметру испытательной площадки, тогда как центральная часть, не контактировавшая с воздухом, осталась в жидком состоянии.

В связи с этим полученные абсолютные значения адгезии нельзя считать окончательными. Тем не менее результаты остаются пригодными для сравнительного анализа, поскольку все образцы испытывались в одинаковых условиях и при одинаковом времени выдержки.

Материал	Гладкий алюминий	Пескоструйная обработка	Изменение
Силикон без праймера	0.332 МПа	0.344 МПа	3.80%
Силикон с праймером	0.33 МПа	0.349 МПа	5.80%

Полученные результаты показывают, что пескоструйная обработка поверхности обеспечивает увеличение адгезии силикона на **3,8%** по сравнению с гладкой поверхностью алюминия. Дополнительное нанесение праймера увеличивает адгезию ещё примерно на **2%**.

При этом визуальный характер разрушения образцов отличается от результатов количественных измерений. Несмотря на несколько более высокое усилие отрыва, на пескоструйной поверхности силикон отделяется от алюминия заметно легче, чем на гладкой поверхности.

На всех фотографиях левая испытательная площадка соответствует образцу с обезжириванием поверхности, правая - образцу с обезжириванием и последующим нанесением праймера.

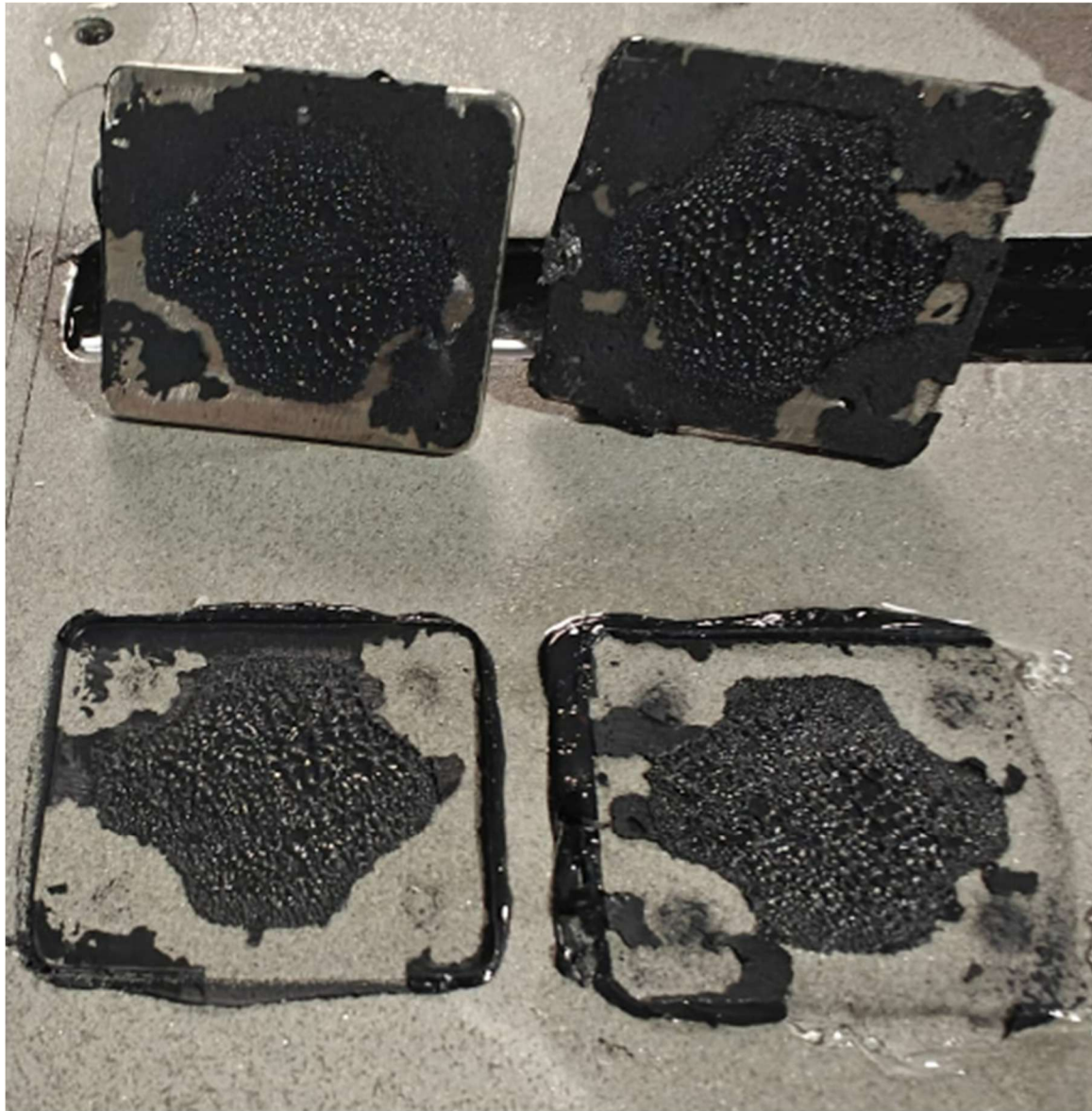
Гладкий алюминий. После разрушения соединения силикон полностью остался на поверхности алюминиевой плиты, при этом произошло его отделение от испытательной площадки из нержавеющей стали.

Пескоструйная поверхность. После разрушения соединения силикон практически полностью отделился от алюминиевой плиты и остался на испытательной площадке из нержавеющей стали. Таким образом, разрушение произошло по границе раздела «силикон - алюминий».

Гладкий алюминий



Пескоструйная обработка



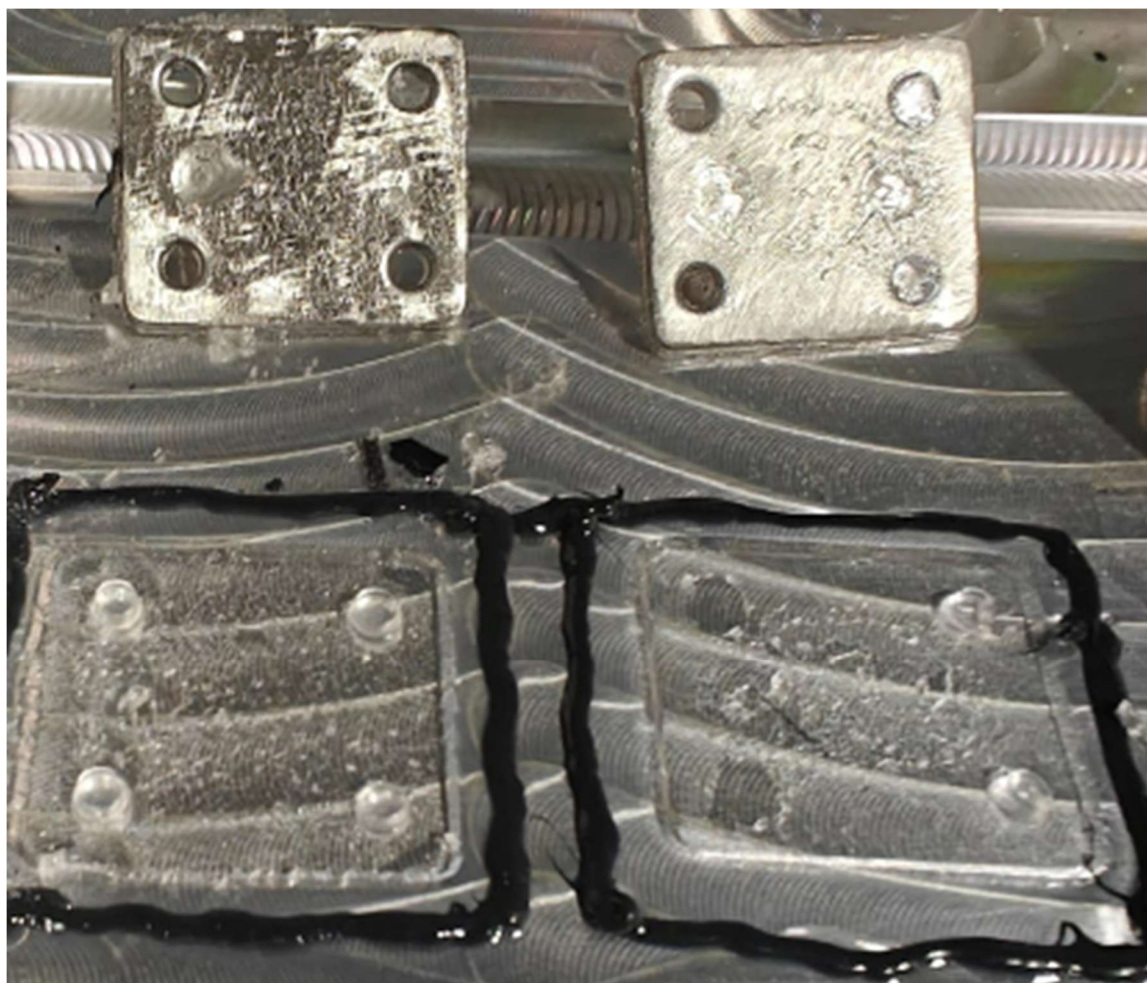
Вывод. Несмотря на то, что измеренное усилие отрыва оказалось выше для пескоструйной поверхности, анализ характера разрушения показывает, что силикон обладает более высокой адгезией к гладкому алюминию. В случае гладкой поверхности разрушение происходило по границе «силикон - испытательная площадка», тогда как на пескоструйной поверхности по границе «силикон - алюминий». Это свидетельствует о более прочном сцеплении силикона с гладким алюминием.

2. Прозрачный компаунд

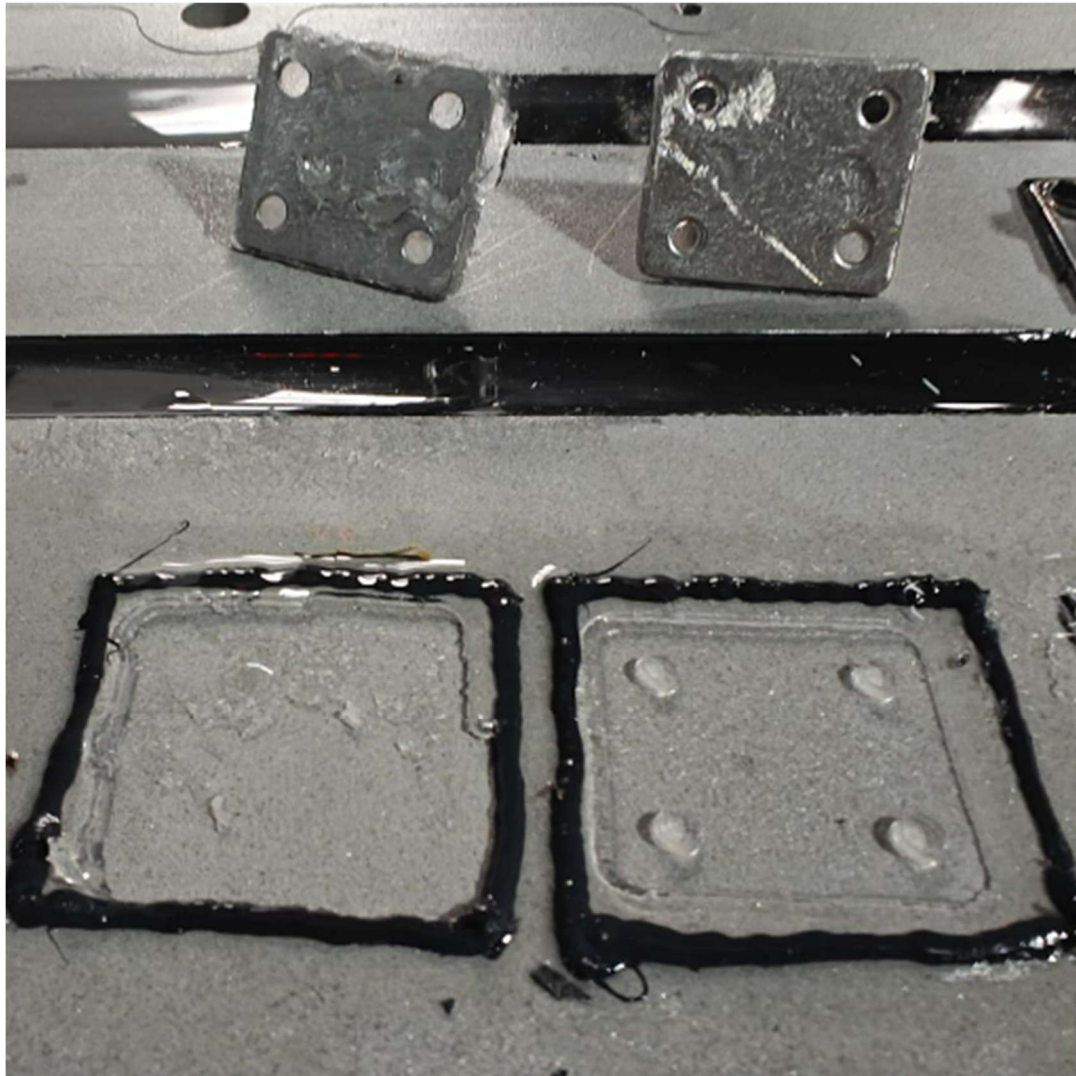
Материал	Гладкий алюминий	Пескоструйная обработка	Изменение
Прозрачный компаунд без праймера	0.126 МПа	0.137 МПа	8.90%
Прозрачный компаунд с праймером	0.158 МПа	0.173 МПа	9.50%

На цифрах также заметно некоторое улучшение адгезии на поверхности с пескоструйной обработкой. Однако визуальная оценка характера разрушения показывает другую картину.

Гладкий алюминий



Пескоструйная обработка



На гладком алюминии произошёл когезионный разрыв: состав остался на обеих склеиваемых поверхностях, а разрушение произошло внутри самого компаунда. Это говорит о том, что адгезия компаунда к алюминию была выше, чем собственная прочность компаунда.

На поверхности после пескоструйной обработки без применения праймера состав полностью отслоился от плиты, что указывает именно на адгезионный разрыв. При этом состав остался только на участке, где предварительно был нанесён праймер.

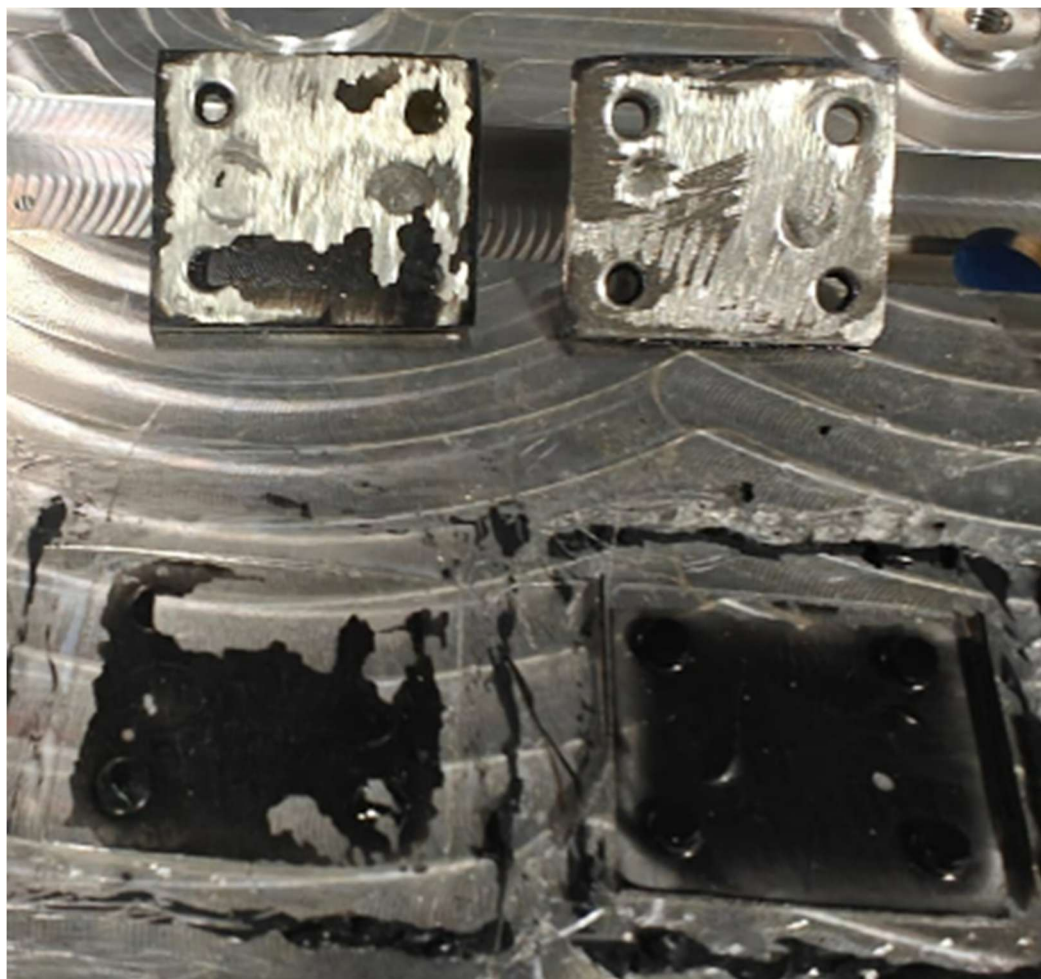
Таким образом, несмотря на небольшое численное улучшение результатов после пескоструйной обработки, фактический характер разрушения показывает, что для прозрачного компаунда более надёжное сцепление наблюдалось на гладком алюминии, особенно при применении праймера.

Вывод: В проведённых испытаниях прозрачный компаунд показал более надёжную адгезию к гладкому алюминию, чем к поверхности после пескоструйной обработки. Несмотря на незначительно более высокие численные значения адгезии после пескоструйной обработки, характер разрушения свидетельствует об обратном. На гладком алюминии наблюдался когезионный разрыв. На пескоструйной поверхности без применения праймера компаунд полностью отслоился от алюминиевой плиты. После нанесения праймера сцепление с пескоструйной поверхностью значительно улучшилось, вероятно благодаря тому, что праймер заполнил микронеровности поверхности и сформировал более подходящий адгезионный слой для компаунда.

3. Чёрный компаунд

Материал	Гладкий алюминий	Пескоструйная обработка	Изменение
Чёрный компаунд без праймера	1.989 МПа	2.06 МПа	3.60%
Чёрный компаунд с праймером	2.542 МПа	1.924 МПа	-24.3%

Гладкий алюминий



Пескоструйная обработка



Вывод

По фотографиям видно, что адгезия чёрного компаунда к пескоструйной поверхности визуально выглядит хуже. После испытания компаунд полностью отделился от алюминиевой плиты, не оставив на ней следов. В случае с гладким алюминием компаунд, наоборот, оторвался от испытательных площадок, но остался на поверхности плиты, что свидетельствует о более прочном сцеплении с алюминием.

При этом следует отметить, что независимо от типа подготовки поверхности прочность соединения остаётся очень высокой. Для разрушения соединения требовалось приложить

усилие свыше **200 кг** к площади склеивания всего **30 × 35 мм**, что соответствует адгезии порядка **2 МПа**.

Влияние праймера

Материал	Гладкий алюминий	Пескоструй	Вывод
Силикон	0.332 → 0.330 МПа (−0.6%)	0.344 → 0.349 МПа (+1.5%)	Влияние практически отсутствует
Прозрачный компаунд	0.126 → 0.158 МПа (+25.4%)	0.137 → 0.173 МПа (+26.3%)	Значительно улучшает адгезию
Чёрный компаунд	1.989 → 2.542 МПа (+27.8%)	2.060 → 1.924 МПа (−6.6%)	На гладком алюминии улучшает, после пескоструя ухудшает

Вывод

Полученные результаты показывают, что универсальное применение праймера для всех материалов нецелесообразно. Его использование оправдано для прозрачного компаунда и может быть полезно для чёрного компаунда при склеивании с гладким алюминием. Для силикона применение праймера в данных испытаниях не показало заметного преимущества.

При этом стоит учитывать, что все выводы основаны на единичных испытаниях каждого варианта. Для окончательного подтверждения закономерностей желательно выполнить серию повторных испытаний (не менее 3–5 образцов на каждую комбинацию материала и подготовки поверхности) и оценить разброс результатов. Это особенно важно для чёрного компаунда, где наблюдается расхождение между численными значениями адгезии и визуальным характером разрушения.

Общие выводы

Основные опасения в ходе разработки были связаны именно с адгезией чёрного компаунда. Однако результаты испытаний показывают, что именно чёрный компаунд обладает наибольшей адгезией среди всех использованных материалов как к гладкому алюминию, так и к поверхности после пескоструйной обработки.

С учётом как численных результатов испытаний, так и визуального анализа характера разрушения можно сделать вывод, что гладкий алюминий полностью подходит для применения в конструкции, а в некоторых случаях обеспечивает даже более надёжное сцепление, чем пескоструйная обработка.

Этот вывод также подтверждается практическим опытом эксплуатации. До моего прихода в ISS плиты изготавливались без пескоструйной обработки (по крайней мере с задней

стороны). Во время сервисного обслуживания плит, находившихся в эксплуатации около трёх лет, не наблюдалось каких-либо признаков отслоения компаунда от алюминия. На приложенной ниже фотографии видно, что один канал очищен для замены кабеля, при этом следов пескоструйной обработки на поверхности нет. Соседний канал с магнитными сенсорами был залит компаундом около трёх лет назад и сохраняет хорошую адгезию.

На мой взгляд, подобные испытания следует проводить ещё на этапе разработки изделия и выбора технологии подготовки поверхности. Это позволит принимать технические решения на основе объективных экспериментальных данных, а не предположений, и избежать внесения в производственный процесс операций, эффективность которых не подтверждена испытаниями.

Фото плиты без пескоструйной обработки, залитой компаундом 3 года назад.

