

HARDLIGHT

ПЛЁНКИ ДЛЯ ВАНН ФОТОПОЛИМЕРНЫХ 3D-ПРИНТЕРОВ

FEP, nFEP / PFA, ACF и TCF

Для чего нужна разделительная плёнка, чем отличаются материал и поверхность, какие параметры действительно важны и как выбрать плёнку под задачу

Коротко

Плёнка в фотополимерном принтере с нижней засветкой — не просто прозрачное дно ванны. Она одновременно работает как оптическое окно и как гибкая разделительная мембрана. Поэтому её материал, толщина, поверхность и натяжение влияют на отрыв слоя, скорость движения платформы, нагрузку на поддержки, качество поверхности и стабильность печати. В продаже появились и матированные FEP/PFA: это не новый полимер, а вариант микротекстуры поверхности со своими плюсами и ограничениями.

Редакция: 19.09.2026

1. Зачем плёнка нужна вообще

В большинстве современных фотополимерных принтеров с нижней засветкой жидкий фотополимер находится в ванне над прозрачным дном. Свет проходит через ЖК-маску или оптическую систему, затем через плёнку и отверждает очередной слой непосредственно у её поверхности.

После экспозиции этот слой одновременно связан с уже напечатанной моделью и контактирует с плёнкой. Чтобы продолжить печать, платформа поднимается, слой отрывается от дна ванны, под него затекает свежий полимер, после чего начинается следующий цикл.

Именно поэтому плёнка должна одновременно решать несколько противоречивых задач:

- хорошо пропускать рабочее УФ-излучение и как можно меньше искажать изображение слоя;
- иметь низкую адгезию к отверждённому полимеру;
- быть достаточно гибкой, чтобы слой отрывался не всей площадью одновременно, а через последовательный процесс отрыва;
- выдерживать многократные циклы растяжения и изгиба;
- сохранять химическую стойкость к фотополимерам и моющим жидкостям;
- оставаться герметичной: прокол плёнки может привести к попаданию фотополимера на экран принтера.

Технический нюанс: усилие отрыва — не только «вакуум»

В разговорной практике проблемы при подъёме часто называют «вакуумом» или «присоской». Это упрощение. На нагрузку влияют адгезия отверждённого слоя к плёнке, деформация самой плёнки, вязкое течение фотополимера и геометрия детали. Выраженный эффект присоски особенно характерен для закрытых или плохо вентилируемых полостей, где при подъёме возникает перепад давления.

2. Что происходит во время отрыва слоя

Гибкая плёнка полезна именно потому, что она прогибается. При подъёме платформы край или локальная область слоя начинает отрываться раньше, затем фронт отрыва распространяется по площади. Если бы дно ванны было абсолютно жёстким и слой пришлось бы отрывать всей площадью одновременно, пиковая нагрузка была бы значительно выше.

Поэтому поведение системы определяется не одним свойством плёнки. На него одновременно влияют:

- площадь и форма сечения модели в конкретном слое;
- наличие закрытых полостей и дренажных отверстий;
- вязкость и температура фотополимера;
- скорость подъёма и возврата платформы;
- высота подъёма — её должно хватить, чтобы слой полностью оторвался от плёнки даже в центре ванны;
- натяжение, толщина и упругость плёнки;
- степень отверждения слоя и реальная площадь его контакта с плёнкой.

По этой причине утверждение «на этой плёнке усилие отрыва вдвое меньше» нельзя переносить на любой принтер и любую модель. Сравнение имеет смысл только при одинаковой геометрии, фотополимере, экспозиции, натяжении и параметрах движения платформы.

3. Какие характеристики плёнки действительно важны

3.1. Антиадгезионные свойства и усилие отрыва

Чем легче отверждённый слой отрывается от поверхности плёнки, тем меньше нагрузка на модель и поддержки. Это даёт большой запас устойчивости печати и после проверки позволяет уменьшать высоту подъёма или повышать скорость. На больших площадях сечения разница проявляется заметнее.

Но низкое усилие отрыва само по себе не гарантирует лучшую печать. Если ради него ухудшается оптическая резкость или поверхность получает текстуру, выигрыш может быть не нужен для конкретной задачи.

3.2. Светопропускание и рассеяние — это не одно и то же

В карточках плёнок обычно первым указывают светопропускание, например 92 или 95 %. Он показывает, какая доля света прошла через материал, но сам по себе не говорит, насколько плёнка рассеивает свет и меняет направление лучей.

Для точности печати важно и светорассеяние. Две плёнки могут пропускать сопоставимую долю света, но по-разному влиять на резкость границ засвечиваемого контура. Выраженная микротекстура обычно увеличивает рассеяние, что может быть заметно на очень мелких элементах и ровных поверхностях.

Почему это важно

Именно поэтому нельзя выбирать плёнку только по цифре «пропускает 95 % УФ-излучения». Для качества мелкой геометрии важны прозрачность, светорассеяние, толщина плёнки и оптика конкретного принтера.

3.3. Толщина

Толщина влияет сразу на механику и оптику. При одинаковом материале более толстая плёнка обычно иначе прогибается при подъёме и может быть жёстче на изгиб. Кроме того, меняется положение рабочей поверхности дна ванны относительно экрана и платформы.

Для композитных плёнок сравнивать только толщину нельзя: ACF толщиной 0,30 мм и FEP толщиной 0,15 мм изготовлены из разных материалов и имеют разную структуру. Но при замене одной на другую изменение положения рабочей поверхности дна ванны нельзя игнорировать.

3.4. Прочность, ресурс и устойчивость к повреждениям

Ресурс плёнки определяется не только паспортным числом циклов. На практике она часто выходит из строя из-за прокола частицей отверждённого фотополимера, повреждения инструментом, неправильной установки или локального растяжения после неудачной печати. Более дорогой материал сам по себе не защищает от механического повреждения.

При оценке ресурса полезнее смотреть на сохранение поверхности и натяжения: глубокие царапины, вмятины, необратимое растяжение, помутнение и любые признаки сквозного повреждения — повод для замены. Подробные признаки замены приведены в разделе 11.2.

3.5. Качество изготовления: чем хорошая плёнка отличается от плохой

Тип материала — только часть выбора. Две плёнки с одинаковой маркировкой FEP или PFA и одной номинальной толщиной могут заметно отличаться по стабильности печати. Для разделительной плёнки важны не только состав и паспортное светопропускание, но и однородность по всей рабочей площади.

- **Равномерность толщины.** Качественная плёнка имеет стабильную толщину по листу. Локальные утолщения и тонкие участки меняют прогиб и натяжение, а также оптический путь света. Слишком тонкая зона дополнительно становится потенциально слабым местом.
- **Оптическая однородность.** На просвет не должно быть мутных зон, полос, пятен, локального изменения прозрачности или цвета. Высокая общая прозрачность ещё не гарантирует качество: если смотреть через плёнку на мелкую контрастную сетку или прямые линии, они не должны заметно изгибаться, «плыть» или увеличиваться отдельными участками. Такие локальные оптические искажения могут быть связаны с неравномерной толщиной, волнистостью или дефектами поверхности.
- **Вкрапления и точечные дефекты.** В хорошем листе не должно быть посторонних частиц, чёрных точек, пузырьков, проколов и заметных включений нерасплавленного или изменённого полимера. В производстве плёнок такие включения часто называют гелями. Они могут рассеивать или перекрывать свет, а некоторые дефекты одновременно создают механически слабую точку.

- **Качество поверхности.** У обычной гладкой FEP или PFA рабочая поверхность должна быть равномерно гладкой, без выраженной шероховатости, продольных полос от экструзии, «апельсиновой корки», затёртостей и глубоких царапин. Исключение — специально матированная плёнка: у неё микротекстура является заданным свойством, а не дефектом.
- **Отсутствие заломов и деформаций.** Залома, складки, вмятины, устойчивые волны и локально растянутые участки для новой плёнки нежелательны. Небольшая кривизна листа после хранения в рулоне сама по себе не обязательно является дефектом, если она исчезает при нормальной установке и натяжении. Стойкий залом или вмятина — уже повреждение.
- **Целые края.** На кромках и особенно в зоне зажима не должно быть надразов, трещин и рваных участков. При натяжении такой дефект может стать началом дальнейшего разрыва.
- **Чистота и транспортировочная защита.** Многие плёнки для 3D-принтеров поставляются с тонкими защитными плёнками с одной или с обеих сторон. Они защищают рабочую поверхность от царапин и загрязнения при перевозке и хранении и обязательно снимаются перед установкой. Само отсутствие защитного слоя ещё не доказывает плохое качество материала — не все производители используют такую упаковку, — но открытая поверхность должна быть идеально чистой и неповреждённой. Если защитная плёнка заявлена производителем, а её нет, это уже повод проверить упаковку и состояние листа.
- **Соответствие заявленным характеристикам.** У нормального поставщика можно узнать фактический материал, номинальную толщину и её допуск, рабочую сторону для ориентированных плёнок и правила установки. Одна только надпись FEP, nFEP или ACF без характеристик не позволяет оценить качество конкретного листа.

Что можно проверить до установки:

- посмотреть лист на равномерном светлом фоне и на просвет — так хорошо видны точки, полосы, мутные зоны и проколы;
- положить плёнку над мелкой контрастной сеткой или текстом и немного перемещать её: локальное «линзовое» искажение сразу становится заметнее;
- осмотреть поверхность под косым светом — царапины, вмятины, заломы и продольные полосы при таком освещении видны лучше;
- если есть подходящий микрометр, измерить толщину в нескольких точках листа без сильного сжатия. Обычный штангенциркуль для плёнки толщиной порядка 0,1–0,15 мм слишком груб и легко даёт вводящий в заблуждение результат.

Есть ещё одно свойство, которое почти невозможно оценить глазами, — равномерность антиадгезионной поверхности. Если на одном и том же листе при одинаковых условиях разные зоны заметно отличаются по отрыву, это может указывать на неоднородность поверхности или изготовления. Такое сравнение имеет смысл только при одинаковой модели, фотополимере, экспозиции и параметрах движения платформы.

4. FEP — классический вариант

FEP — фторполимер, сополимер тетрафторэтилена и гексафторпропилена. Его ценят за химическую стойкость, низкую поверхностную энергию, прозрачность и хорошие разделительные свойства.

В фотополимерной печати FEP остаётся базовым вариантом: он предсказуем, сравнительно недорог, широко доступен и обеспечивает хорошую прозрачность дна ванны.

Сильные стороны FEP:

- хорошая прозрачность и низкое рассеяние у качественной плёнки;
- невысокая стоимость;
- простая и понятная установка;
- широкая совместимость с классическими ваннами.

Ограничения FEP:

- по сравнению с PFA и ACF усилие отрыва часто выше;
- при большой площади слоя приходится внимательнее относиться к поддержкам и параметрам подъёма;
- толщина сильно влияет на результат: толстая FEP может вести себя заметно иначе, чем тонкая.

FEP обычно имеет толщину 100, 127, 150 и 200 мкм (0,10; 0,127; 0,15 и 0,20 мм).

5. nFEP / PFA — что это на самом деле

Здесь есть важная терминологическая путаница. nFEP — распространённое коммерческое обозначение в фотополимерной печати, но это не отдельное общепринятое химическое название полимера. В документации многих производителей такие плёнки обозначаются как PFA (nFEP).

PFA — фторполимер, сополимер тетрафторэтилена и перфторалкилвиниловых эфиров. Это другой материал, а не просто «улучшенная обработкой FEP». По химической природе FEP и PFA родственны, но не идентичны.

На практике PFA/nFEP обычно выбирают за сочетание гладкой прозрачной поверхности и более лёгкого отрыва слоя по сравнению с обычной FEP.

Сильные стороны nFEP / PFA:

- низкая адгезия и хорошая стабильность отрыва;
- высокая оптическая прозрачность;
- хорошее сохранение мелкой геометрии и чистой поверхности;
- удобный универсальный вариант для большинства задач.

Ограничения:

- обычно дороже обычной FEP;
- реальный выигрыш зависит от конкретной толщины, натяжения и принтера;
- не стоит переносить настройки подъёма и экспозиции с другой плёнки без проверки.

nFEP/PFA обычно имеет толщину 100, 127, 150 и 200 мкм (0,10; 0,127; 0,15 и 0,20 мм).

Не путайте название с химией

Фраза «nFEP — это улучшенная FEP» удобна для маркетинга, но технически неточна. Для выбора и документации корректнее писать nFEP / PFA и считать PFA фактическим материалом, если это подтверждено спецификацией конкретной плёнки.

5.1. Матированные FEP и PFA — тот же материал, другая поверхность

Помимо обычных гладких FEP и PFA/nFEP, в продаже появились варианты с микротекстурированной, или матированной, поверхностью. Это не отдельный полимер и не новый тип плёнки в одном ряду с FEP, PFA и ACF: основой остаётся FEP или PFA, меняется прежде всего характер поверхности.

Производитель связывает микротекстуру с более стабильным отрывом больших сплошных сечений и уменьшением эффекта «присоски». При этом в той же сравнительной таблице для матированной FEP указано немного более высокое усилие отрыва, чем для гладкой FEP. Поэтому корректнее говорить не о безусловно меньшем усилии, а о другом характере контакта и отрыва на больших площадях.

Что меняется на практике:

- Оптика. Матированная поверхность сильнее рассеивает свет. В представленных данных производителя для матированной FEP указано около 90–93 % светопропускания на 405 нм против 94–96 % у гладкой FEP. Эти значения относятся к конкретным плёнкам и не должны автоматически переноситься на все матированные FEP или PFA.
- Поверхность модели. Если микротекстурированная сторона контактирует с фотополимером, её рельеф может передаваться поверхности первых слоёв: она получается менее зеркальной. Производитель также отмечает возможное небольшое сглаживание очень мелкой геометрии. Одновременно мелкие царапины самой плёнки могут быть менее заметны на отпечатке.
- Ресурс и уход. Производитель считает теоретический срок службы матированной и гладкой FEP сопоставимым, но предупреждает, что микрорельеф может удерживать остатки фотополимера. Поэтому для матированной поверхности особенно важна аккуратная очистка: загрязнение может быстрее ухудшить её рабочие свойства.

- Фотополимеры. Производитель рекомендует матированную FEP прежде всего для жёстких составов и крупных плоских деталей и не рекомендует её для очень мягких гибких фотополимеров, указывая, что мягкий материал может сильнее удерживаться в микрорельефе. Это рекомендация для конкретного продукта, а не общее правило для всех матированных FEP и PFA.
- Цена. Матированные исполнения обычно дороже стандартных гладких, но само по себе матирование не означает более высокое качество печати — оно меняет баланс между характером отрыва, оптикой и поверхностью детали.

О рассеянии и «пересвете»

Некоторые производители связывают микротекстуру с более равномерным распределением УФ-излучения, уменьшением локальных зон повышенной интенсивности и меньшим риском избыточного отверждения. Это следует считать свойством, заявленным для конкретной плёнки. Само по себе рассеяние не гарантирует меньший «пересвет»: результат зависит от оптики принтера, фотополимера, толщины плёнки и экспозиции.

Ориентация сторон

Нельзя автоматически считать, что матовая сторона должна быть обращена к фотополимеру или, наоборот, к экрану. У разных разделительных плёнок конструкция различается. Например, у распространённой ACF матовая сторона обращена к экрану, но это правило нельзя переносить на матированные FEP/PFA. Устанавливать такую плёнку нужно по маркировке и инструкции конкретного производителя.

6. ACF — низкое усилие отрыва, скорость и крупный формат

ACF — распространённое коммерческое обозначение композитной разделительной плёнки. В отличие от классической прозрачной FEP/PFA, у таких плёнок стороны могут выполнять разные функции. Для распространённых ACF глянцевая сторона обращена к фотополимеру, матовая — к экрану.

Основное преимущество ACF — очень низкое усилие отрыва. Производители используют это для сокращения высоты подъёма и повышения скорости печати. Но этим её назначение не ограничивается.

Почему ACF полезна на крупных принтерах

На большом экране растёт максимальная возможная площадь одного слоя. Одновременно увеличивается размер свободного пролёта плёнки между точками крепления. В результате при отрыве могут возрастать пиковые нагрузки и требуемый ход платформы, особенно у моделей с большими сплошными сечениями.

Низкое усилие отрыва ACF уменьшает нагрузку на модель и поддержки. Поэтому для крупноформатных принтеров ACF имеет смысл даже тогда, когда пользователь не стремится к рекордной скорости.

Сильные стороны ACF:

- низкое усилие отрыва слоя;
- возможность сократить высоту подъёма и увеличить скорость после настройки;
- особенно полезна для крупных моделей и больших площадей сечения;
- может повысить устойчивость слабых поддержек за счёт меньшей нагрузки при отрыве.

Компромиссы ACF:

- композитная и часто матовая структура может сильнее рассеивать свет, чем прозрачная PFA;
- на отдельных ровных поверхностях может быть заметнее текстура, связанная с поверхностью и оптическими свойствами плёнки;
- плёнка толще и требует повторной проверки геометрической калибровки;
- неправильная ориентация сторон — не просто причина неудачной печати: она резко повышает риск повреждения и разрыва ACF;

Типичная ACF имеет толщину 300 мкм (0,30 мм). Встречаются также упоминания ACF толщиной 200 мкм (0,20 мм).

ACF не означает автоматически «хуже детализация»

Результат зависит от конкретной плёнки, оптики принтера, фотополимера и геометрии модели. В сравнительных тестах ACF может хорошо сохранять мелкие детали, но на отдельных ровных поверхностях её текстура заметнее, чем у гладкой PFA. Поэтому при критичном качестве поверхности правильнее сравнить ACF и PFA на одном принтере и одной модели.

7. TCF — термин, который нужно читать по спецификации

С TCF ситуация ещё менее стандартизирована, чем с nFEP. На рынке это обозначение встречается у разных композитных разделительных плёнок, но единой общепринятой химической расшифровки и единого набора свойств для «TCF вообще» нет.

Например, для некоторых принтеров UniFormation в продаже встречаются плёнки с обозначениями TCF/PFAC. Поскольку эти сокращения не задают единый материал, свойства, структуру и толщину нужно брать из документации конкретного изделия.

Поэтому при выборе TCF не стоит делать выводы по трём буквам. Нужно смотреть техническую документацию конкретного производителя: структуру, толщину, ориентацию сторон, светопропускание, поверхность и рекомендуемые режимы печати.

Практическое правило

FEP и PFA — названия конкретных фторполимеров. ACF и TCF в 3D-печати чаще описывают конструкцию или коммерческий класс разделительных плёнок. Для ACF/TCF свойства конкретного продукта важнее самого сокращения.

8. Сравнение типов плёнок

Параметр	FEP	nFEP / PFA	ACF	TCF*
Структура	Однослойный фторполимер	Однослойный PFA	Композитная, ориентированные стороны	Зависит от производителя; обычно композитная
Типичная толщина	≈0,10–0,15 мм	≈0,127–0,15 мм	≈0,20–0,30 мм	Проверять по технической документации конкретной плёнки
Усилие отрыва	Базовый уровень	Обычно ниже, чем у FEP	Обычно очень низкое	Зависит от конкретной плёнки
Прозрачность / рассеяние	Высокая прозрачность, обычно небольшое рассеяние	Высокая прозрачность, обычно небольшое рассеяние	Хорошая прозрачность, но рассеяние может быть выше	Проверять по документации и тестовой печати
Скоростная печать	Обычная	Хорошая	Сильная сторона	Зависит от конкретной плёнки
Крупный формат	Работает, но часто требует более осторожных параметров подъёма	Очень хороший универсальный вариант	Особенно полезна при большой площади слоя	Может быть полезна, если это подтверждено спецификацией
Поверхность / мелкая геометрия	Хорошо	Обычно лучший универсальный баланс	Нужно проверить на критичных плоских поверхностях	Нужно проверять конкретную плёнку
Когда выбирать	Стоимость, стабильный процесс	Точность, поверхность, универсальность	Скорость и крупный формат	По данным конкретной плёнки

* TCF не является единым стандартизованным названием материала в фотополимерной печати. Матированные FEP/PFA не вынесены в отдельный столбец: это варианты поверхности FEP или PFA, а не отдельный материал; их особенности разобраны в разделе 5.1.

9. Почему размер модели иногда важнее размера экрана

Сам по себе большой принтер не означает, что каждый слой будет тяжёлым для отрыва. Ключевой параметр — реальная площадь и геометрия конкретного слоя. Маленькая ажурная деталь на 15-дюймовом принтере может отрываться легче, чем широкая сплошная пластина на 10-дюймовом.

Особенно неблагоприятны:

- большие сплошные площади, ориентированные почти параллельно дну ванны;
- закрытые полости без достаточных отверстий для выравнивания давления;
- резкое увеличение площади сечения от слоя к слою;
- высоковязкие фотополимеры при низкой температуре;
- слишком быстрый подъём при недостаточной высоте подъёма для полного отрыва слоя.

Поэтому ACF или низкоадгезионная композитная плёнка полезна не только «для быстрого принтера», а как один из способов снизить нагрузку системы при неблагоприятной геометрии и большой площади слоя.

10. Толщина плёнки и перекалибровка принтера

При смене материала важно разделять два вида настройки: механическую геометрию первого слоя и технологический профиль печати.

10.1. Механическая калибровка

При переходе, например, с плёнки толщиной 0,15 мм на плёнку толщиной 0,30 мм разница составляет 0,15 мм — это эквивалент трёх стандартных слоёв по 50 мкм.

Точная величина смещения рабочей поверхности зависит от конструкции рамки, способа зажима и натяжения, поэтому нельзя утверждать, что нулевая точка по оси Z всегда изменится ровно на 0,15 мм. Но сама разница достаточно велика, чтобы после перехода на другую толщину повторить предусмотренную производителем процедуру установки платформы и нулевой точки.

Если принтер использует датчик усилия, автоматическое выравнивание или фиксированную заводскую геометрию, следует выполнять именно штатную процедуру производителя, а не компенсировать толщину произвольным ручным смещением нулевой точки по оси Z.

10.2. Технологическая калибровка

Даже после правильной геометрии первого слоя новая плёнка может потребовать изменения профиля:

- экспозиции обычных и нижних слоёв — из-за различий в светопропускании и рассеянии;
- скорости подъёма — из-за другого усилия отрыва;
- высоты подъёма — из-за другого прогиба и характера отрыва;
- скорости возврата и пауз — особенно при вязких фотополимерах и больших площадях.

Главная мысль

При переходе на плёнку другой толщины сначала проверяют положение платформы и нулевую точку по оси Z, а затем — экспозицию и параметры отрыва слоя. Это две разные настройки.

11. Установка и натяжение

Даже лучшая плёнка будет работать плохо, если она установлена неверно.

- Обычные гладкие FEP и PFA обычно не имеют заданной рабочей стороны после удаления транспортировочных защитных слоёв, если производитель не указал иное. У матированных FEP/PFA ориентация может быть задана отдельно, поэтому универсального правила «матовой стороной вверх» или «матовой стороной вниз» нет.
- Для ACF и большинства двухслойных композитных плёнок ориентация критична. У распространённой ACF глянцевая сторона обращена к фотополимеру, матовая — к экрану.

ВАЖНО: ОРИЕНТАЦИЯ ACF — КРИТИЧНА

Если производитель конкретной ACF указывает глянцевую сторону к фотополимеру, ставить матовую сторону к фотополимеру нельзя. Матовая поверхность имеет другие разделительные свойства, поэтому при такой установке резко возрастает удержание отверждённого слоя и нагрузка на плёнку при отрыве. Вероятность деформации и разрыва ACF при такой установке может стать очень высокой. Разрыв плёнки приводит к вытеканию жидкого фотополимера на экран принтера. Если защитная плёнка или защитное стекло не удержат протечку, экран может потребовать ремонта, а нередко — замены. Ориентацию сторон ACF нужно проверить до заливки фотополимера в ванну.

- TCF устанавливают только по маркировке и инструкции конкретного производителя: термин не гарантирует одинаковую конструкцию у разных поставщиков.
- Натяжение следует выполнять по процедуре конкретной ванны. Универсальный совет «настроить по звуку на такую-то частоту» ненадёжен, если производитель принтера не задаёт этот метод.
- После установки нужно проверить отсутствие складок, мусора под плёнкой, частиц отверждённого полимера и следов повреждения.

11.1. Эксплуатация и уход

Плёнка чаще повреждается не во время нормальной печати, а при попытке удалить с неё прилипший отверждённый полимер или твёрдый мусор после сбоя. Поэтому задача ухода — не «отмывать до блеска», а не оставлять твёрдые частицы в ванне, не царапать рабочую поверхность и регулярно осматривать плёнку.

Между нормальными печатями

Если печать прошла нормально, смола чистая и следующая печать выполняется тем же материалом, полностью сливать и мыть ванну после каждого задания обычно не требуется. Достаточно убедиться, что в смоле нет отломанных поддержек, кусочков модели и других твёрдых частиц.

После любой неудачной печати ванну нужно проверить обязательно: даже маленький кусок отверждённого полимера при следующем опускании платформы может быть вдавлен в плёнку и проколоть её.

Очистка всей площади засветкой

Если на плёнке прилипло много мелких остатков или в ванне рассыпались частицы неудачной печати, удобнее не снимать их по одной, а засветить сплошной лист полимера по всей площади экрана. Такой лист забирает с собой прилипшие и лежащие на дне фрагменты.

Если в принтере есть штатный режим «Очистка ванны» / Vat Cleaning / Tank Clean, используйте его. Принтер включает весь экран без печати обычной модели и формирует на плёнке тонкий сплошной лист отверждённого полимера.

Если такого режима нет, ту же операцию можно воспроизвести через слайсер: сделать прямоугольник размером с область засветки и толщиной в один слой, чтобы файл содержал одну сплошную экспозицию. Запускать такой файл без платформы следует только на принтере, конструкция и прошивка которого позволяют это сделать безопасно; защитные датчики и штатные ограничения обходить нельзя.

В ванне при такой очистке должен находиться полимер и полностью покрывать дно. Практически удобно оставить небольшой слой — порядка 1–2 мм над плёнкой: этого достаточно для формирования листа и не приходится потом сливать большой объём смолы.

Для многих LCD-принтеров практической отправной точкой является экспозиция около 10–15 секунд, но это не универсальное значение. Мощность источника, фотополимер и алгоритм конкретного принтера различаются; если производитель задаёт собственное время очистки, использовать нужно его. У разных систем штатные значения могут заметно отличаться.

После засветки на дне остаётся цельный лист полимера размером примерно с экран. Его аккуратно начинают отделять с края или угла пластиковым либо другим неострым инструментом. Смысл метода в том, что вместе с листом снимаются мелкие остатки, которые были приклеены к плёнке или лежали на её поверхности. Не нужно соскабливать каждый фрагмент отдельно.

После снятия листа жидкий полимер нужно слить через фильтр, чтобы не вернуть в ванну оставшиеся твёрдые частицы. Затем плёнку осматривают на просвет и под косым светом. Если на ней ничего не осталось и она не повреждена, можно переходить к новой печати; при необходимости выполняют обычную мягкую очистку.

Ручная очистка

Металлическим шпателем, ножом, иглой и другими острыми инструментами по плёнке не работают. Если нужно отделить одиночный прилипший фрагмент, безопаснее использовать пластиковый или силиконовый инструмент и, при необходимости, слегка прогнуть плёнку снизу пальцем в чистой перчатке, чтобы край детали сам начал отходить.

Не стоит интенсивно тереть загрязнённую плёнку насухо: твёрдая частица превращается в абразив и оставляет царапину. Для протирки используют мягкий безворсовый материал и только тот растворитель, который допускает производитель конкретной ванны или плёнки. Универсального правила «всегда мыть IPA» нет.

Матированную FEP/PFA не нужно пытаться «отполировать» до глянца: микротекстура является свойством рабочей поверхности. При этом она может сильнее удерживать остатки фотополимера, поэтому загрязнение нужно удалять особенно аккуратно, без интенсивного трения.

Наружная сторона дна ванны перед установкой в принтер должна быть сухой и чистой. Капля фотополимера, пыль или твёрдая частица между ванной и экраном опасны и для качества изображения, и для самого экрана.

Чего делать не стоит

- снимать отверждённый полимер металлическим скребком, ножом или лезвием;
- давить острым предметом на одну точку плёнки;
- продолжать печать после неудачи, не проверив, нет ли твёрдых частиц на дне;
- тереть плёнку сухой салфеткой, если на поверхности может быть абразивный мусор;
- использовать неизвестный растворитель только потому, что он хорошо отмывает фотополимер;
- ставить ванну на экран с влажной, загрязнённой или покрытой смолой наружной стороной.

11.2. Когда плёнку нужно менять: признаки

Универсального срока службы в часах или количестве печатей нет. Плёнку меняют по её состоянию, а не по календарю. После каждой неудачной печати дно ванны стоит осмотреть до следующего запуска.

Менять немедленно:

- прокол, порез, трещина, сквозное повреждение или любая течь;
- глубокая царапина, залом, сильная вмятина или выпуклость после попадания твёрдой частицы между платформой и плёнкой;
- для ACF/TCF и других многослойных плёнок — расслоение, пузыри между слоями, отрыв или разрушение рабочей поверхности.

Плёнку также стоит заменить, если:

- она заметно потеряла натяжение, появилась постоянная волна, провисание или локально растянутый участок;
- помутнение, стойкое загрязнение или повреждение поверхности уже влияет на прохождение света или качество отпечатка;
- дефекты печати регулярно появляются в одной и той же зоне ванны и другие причины исключены;
- после неудачной печати состояние плёнки вызывает сомнение: стоимость плёнки несопоставима со стоимостью экрана и последствиями протечки.

Небольшие поверхностные царапины сами по себе не всегда требуют немедленной замены, если плёнка герметична, сохраняет натяжение и дефект не отражается на печати. Но при любом подозрении на сквозное повреждение печать продолжать нельзя.

12. Как выбрать плёнку на практике

Выбор лучше начинать не с вопроса «какая плёнка самая современная», а с ограничений конкретного принтера и задачи.

Ситуация	Рациональный стартовый выбор	Почему
Нужен доступный расходник и текущая печать стабильна	FEP	Минимум затрат и предсказуемое поведение
Нужен универсальный вариант с хорошей поверхностью	nFEP / PFA	Баланс сниженного усилия отрыва и хороших оптических свойств
Критична мелкая геометрия и чистые ровные поверхности	nFEP / PFA	Обычно меньше риск заметной текстуры от поверхности плёнки
Главный приоритет — высокая скорость	ACF	Низкое усилие отрыва позволяет после настройки уменьшать высоту подъёма
Крупный принтер или большие сплошные площади слоя	ACF; PFA как альтернатива	ACF снижает нагрузку при отрыве; PFA сохраняет хороший баланс качества поверхности и оптики
Принтер штатно рассчитан на ACF или специальную плёнку	Штатный тип	Конструкция и профили могут быть оптимизированы именно под него
Предлагается TCF	Проверить техническую документацию конкретной TCF	Сокращение не гарантирует одинаковую конструкцию и свойства
Большие плоские сечения; рассматривается матированная FEP/PFA	Проверить конкретную плёнку тестовой печатью	Микротекстура может изменить характер контакта на большой площади, но одновременно влияет на рассеяние света, поверхность детали и требования к очистке

Нормальный универсальный выбор

Если производитель принтера не требует специальной плёнки, скорость не является главным приоритетом, а нужна стабильная печать с хорошей поверхностью, nFEP/PFA обычно является наиболее универсальной отправной точкой. FEP остаётся рациональным экономичным вариантом, а ACF особенно интересна при больших площадях отрыва и скоростной печати.

13. Когда не нужно переходить на другой тип плёнки

Замена FEP на PFA или ACF — не обязательное улучшение. Если текущий процесс стабилен, поверхность устраивает, поддержки не перегружены, а время печати приемлемо, сам факт появления нового материала не создаёт технической необходимости что-то менять.

Смена типа имеет смысл, когда есть понятная цель: уменьшить нагрузку при отрыве, повысить скорость, улучшить поверхность, решить проблему крупного формата или заменить недоступный штатный расходник.

14. Частые заблуждения

«Чем выше светопропускание, тем лучше плёнка»

Нет. Важны также рассеяние, поверхность, толщина и оптика принтера.

«nFEP — это просто улучшенная FEP»

Не совсем. В 3D-печати nFEP обычно означает PFA; это другой фторполимер.

«Матированная FEP/PFA — это ещё один новый материал»

Нет. Матирование описывает микротекстуру поверхности. Сам материал при этом остаётся FEP или PFA.

«Матовая сторона всегда должна быть обращена к фотополимеру»

Нет. Ориентация зависит от конструкции конкретной плёнки. Её нужно проверять по маркировке и инструкции производителя.

«ACF нужна только для скорости»

Нет. Низкое усилие отрыва особенно полезно при больших площадях слоя и на крупноформатных принтерах.

«Чем меньше отрыв, тем всегда лучше качество»

Нет. Оптическая структура и поверхность плёнки могут быть важнее для мелкой геометрии.

«Если лист подходит по размеру, можно ничего не перенастраивать»

При смене толщины нужно проверить механическую калибровку; при смене типа — экспозицию и параметры движения.

«TCF всегда лучше ACF»

Так утверждать нельзя: TCF не является единым стандартизованным материалом. Сравнивают конкретные изделия и их технические характеристики.

15. Итог

Плёнка дна ванны — полноценный элемент печатающей системы. Она влияет на световой тракт, механику отрыва, нагрузку на поддержки и допустимую кинематику платформы.

FEP остаётся простым и экономичным стандартом. nFEP/PFA даёт универсальный баланс прозрачности, качества поверхности и сниженного усилия отрыва. Матированные FEP/PFA добавляют ещё один вариант поведения рабочей поверхности: микротекстура может быть полезна при больших площадях контакта, но требует учитывать рассеяние света, возможную текстуру на детали и особенности очистки. ACF особенно полезна там, где важно уменьшить усилие отрыва: при высокой скорости печати, на крупноформатных принтерах и при больших площадях слоя. TCF следует оценивать только по документации конкретного продукта, поскольку это обозначение не стандартизовано.

Правильный выбор — это не поиск «лучшей плёнки вообще», а подбор под конкретный принтер, размер ванны, геометрию моделей, требуемое качество поверхности и режим печати.

Практическое продолжение

После выбора типа плёнки нужно определить размер. По модели принтера или габаритам ванны это можно сделать в онлайн-инструменте HARDLIGHT, без поиска в длинных таблицах совместимости.

Выбор плёнки HARDLIGHT: tools.hardlight3d.com/tools/film/

Источники и технические примечания

Статья собрана как обзор: данные производителей использованы для терминологии и типичных характеристик, а сравнительные тесты — только как примеры поведения в конкретных условиях. Числа из одного теста не следует переносить на любой принтер без проверки.

Интернет-источники отмечены одинаковой явной ссылкой «[Открыть источник](#)».

1. Phrozen — справочный материал о различиях FEP, PFA (nFEP) и ACF — [Открыть источник](#)
2. Phrozen — ACF: толщина 300 мкм, ориентация глянцевой и матовой сторон, низкое усилие отрыва — [Открыть источник](#); Monocure3D — предупреждение о риске разрыва плёнки и повреждения ЖК-экрана при неправильной ориентации — [Открыть источник](#)
3. Anycubic — разделительные плёнки для серии Photon: типы плёнок, толщины и светопропускание — [Открыть источник](#)
4. ELEGOO — разделительная плёнка PFA: толщина, светопропускание и рекомендации — [Открыть источник](#)
5. Daikin — фторполимерные плёнки: сравнительные свойства PFA и FEP — [Открыть источник](#)
6. Daikin — разделительные фторполимерные плёнки: свойства и области применения — [Открыть источник](#)
7. AmeraLabs — сравнение ACF, nFEP и FEP: усилие отрыва и качество поверхности — [Открыть источник](#)
8. Liqcreate — сравнение FEP и PFA: практический тест зависимости результата от условий печати — [Открыть источник](#)
9. HARDLIGHT — карточка TCF: характеристики конкретной композитной плёнки HARDLIGHT — [Открыть источник](#)
10. Сравнительная таблица: гладкая FEP и матированная FEP — данные предоставлены производителем матированных плёнок.
11. Chemours — Teflon FEP: контроль качества, однородность толщины и отсутствие внутренних пустот — [Открыть источник](#)
12. Intertek — типичные дефекты полимерных плёнок: включения и гели — [Открыть источник](#); AMETEK Surface Vision — контроль дефектов поверхности плёнки, включая чёрные точки, проколы и царапины — [Открыть источник](#)
13. ELEGOO — инструкция по замене FEP: удаление транспортировочных защитных плёнок с обеих сторон перед установкой — [Открыть источник](#)
14. Chen и соавт. — исследование прохождения света и искажений волнового фронта через тонкую FEP-плёнку — [Открыть источник](#)
15. Formlabs — очистка ванны после неудачной печати, печать cleaning sheet и фильтрация полимера — [Открыть источник](#)
16. Phrozen — штатная функция Vat Cleaning: полная засветка экрана и формирование сплошного слоя на FEP — [Открыть источник](#)

Примечание по TCF: коммерческое обозначение встречается у разных поставщиков и не задаёт единую химическую формулу или конструкцию. Поэтому в статье свойства TCF не обобщаются на все продукты с таким названием.