

ОПТИМИЗАЦИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ FDM-ИЗДЕЛИЙ: ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧАТИ И МЕТОДОВ ПОСТОБРАБОТКИ

Тараховский А.Ю., Репинский Б.А.

Севастопольский государственный университет, Севастополь

Ключевые слова: 3D-печать, FDM-технология, шероховатость поверхности, Ra-параметр, постобработка, дихлорметан, дегидратация филамента, ацетоновая баня, аддитивное производство, механическая обработка, химическая обработка, прототипирование, качество поверхности.

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования методов улучшения качества поверхности изделий, полученных методом FDM 3D-печати из пластиков ABS, PLA и PETG. Установлено влияние высоты слоя (0,2 и 0,12 мм) и дегидратации филамента на шероховатость Ra (40-60 мкм и 25-33 мкм соответственно), подтвержденное линейной регрессией ($R^2 = 1$). Разработаны и апробированы постобработки: шлифовка (эффективна для ABS), паровая ацетоновая обработка (Ra 0,9-2 мкм для ABS), нанесение дихлорметана (ДХМ) с комбинированным шлифованием (Ra 14-26 мкм для PLA/PETG). Оценка проводилась профилометром «Протон» по ГОСТ 2789-73.

OPTIMIZATION OF SURFACE ROUGHNESS OF FDM PRODUCTS: THE INFLUENCE OF PRINTING PARAMETERS AND POST-PROCESSING METHODS

Tarakhovskiy A.Yu., Repinsky B.A.

Sevastopol State University, Sevastopol

Keywords: 3D printing, FDM technology, surface roughness, Ra parameter, post-treatment, dichloromethane, filament dehydration, acetone bath, additive manufacturing, mechanical processing, chemical processing, prototyping, surface quality/

Abstract. The article presents the results of an experimental study of methods for improving the surface quality of products obtained by FDM 3D printing from ABS, PLA and PETG plastics. The effect of the layer height (0.2 and 0.12 mm) and the dehydration of the filament on the roughness of Ra (40-60 microns and 25-33 microns, respectively) was established, confirmed by linear regression ($R^2 = 1$). Post-treatments have been developed and tested: grinding (effective for ABS), steam acetone treatment (Ra 0.9-2 microns for ABS), application of dichloromethane (DCM) with combined grinding (Ra 14-26 microns for PLA/PETG). The assessment was carried out with a Proton profilometer according to GOST 2789-73.

Популяризация и общедоступность технологии 3D печати ставит перед сообществом «3D печатников» новые задачи – обеспечение качества поверхности [1]. ГОСТ 2789-73 устанавливает параметры и характеристики шероховатости поверхности изделий независимо от материала и способа обработки [2]. Данный стандарт определяет перечень ключевых параметров (Ra, Rz, Rp и др.), типы направлений неровностей (повдольное, поперечное, круговое и т.д.) и числовые значения для требований и контроля. Требования к шероховатости вводятся только по функциональному назначению поверхности (например, Ra 10-40 мкм для инженерных деталей); без необходимости контроль не обязателен. Исключает дефекты (поры, трещины, царапины) – они нормируются отдельно.

Как показал практический опыт применения FDM печати, для получения приемлемого качества поверхности (уровень шероховатости $Ra \leq 25-30$ мкм без постобработки, при котором деталь визуально гладкая, без выраженной слоистости, и пригодна для прототипирования или декоративного применения) в большинстве случаев требуется постобработка. Среди наиболее распространённых и доступных способов можно выделить следующие: Шлифование, Дихлорметановое либо дихлорэтановое покрытие, «ацетоновая баня», а также с использованием мелкодисперсной шпаклёвки и краски, и различные сочетания данных способов. Способ зависит от материала пластика и режимов печати.

Рассмотрим результаты FDM-печати для двух базовых образцов без постобработки: образец №1 получен с высотой слоя 0,2 мм без предварительной сушки (дегидратации) филамента, образец №2 – с высотой слоя 0,12 мм после 8-часовой сушки.

Измерения шероховатости проведены профилометром «Протон»: для образца №1 среднее значение Ra составило 40-60 мкм, для образца №2 – 25-33 мкм (усреднённое 29 мкм). Уменьшение высоты слоя в сочетании с дегидратацией филамента обеспечивает базовое улучшение качества поверхности на 42% (снижение Ra с 50 до 29 мкм) (рис. 1), что является наиболее простым способом оптимизации FDM-печати.

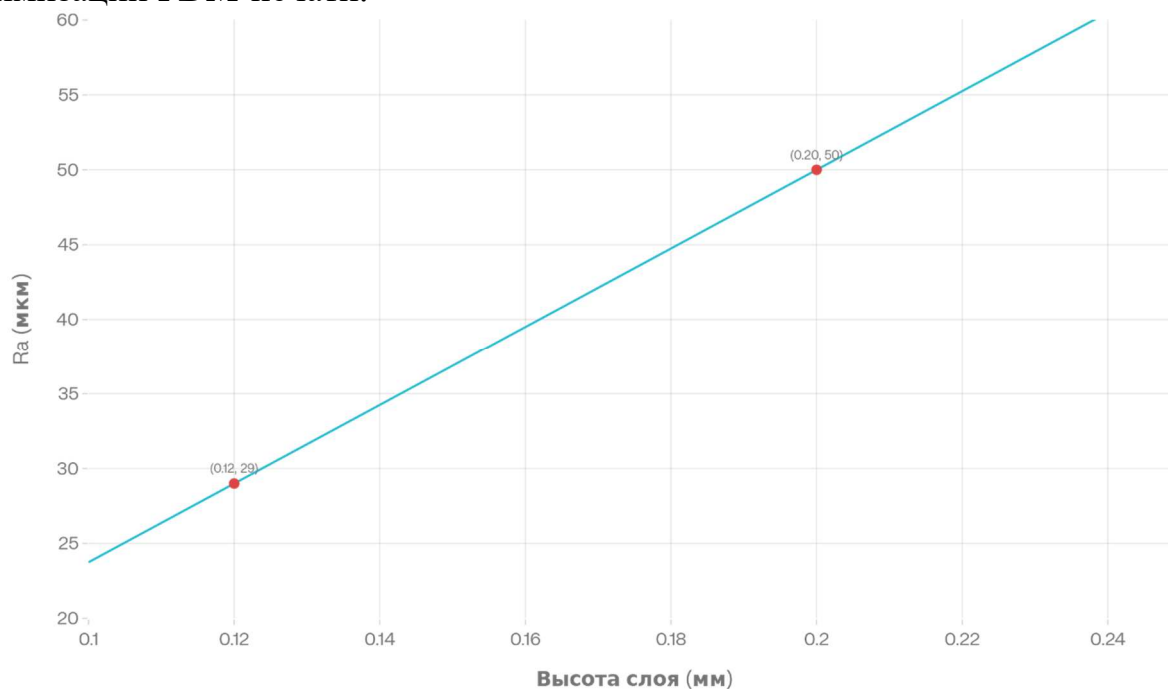


Рис. 1. Зависимость Ra от высоты слоя (базовые условия)

Рассмотрим и сравним существующие методы постобработки изделий, полученных способом FDM печати [3-7].

Наиболее простым и доступным методом постобработки FDM-изделий является шлифование наждачной бумагой. Однако этот способ рекомендуется применять преимущественно к изделиям из ABS-пластика, поскольку PLA, PETG и другие подобные материалы при шлифовании склонны к образованию волокнистой «мохнатой» поверхности. Шлифование эффективно снижает шероховатость Ra у ABS (с 40-60 до более гладких значений), но требует

осторожности с PLA/PETG из-за их меньшей твердости и склонности к деформации волокон. Рекомендуется начинать с крупнозернистой наждачки (P80–P180), переходя к мелкой (P400+), с увлажнением для ABS и сухим способом для избежания нагрева.

Специфическим методом химической постобработки изделий из ABS-пластика является паровая ацетоновая обработка («ацетоновая баня»). Процесс заключается в помещении детали в герметичный контейнер с небольшим количеством ацетона, нагреваемый до температуры 56°C, что приводит к контролируемому паровому воздействию на поверхность с постепенным оплавлением и формированием глянцевої глади. Профилометрические измерения обработанного таким способом образца показывают среднее значение шероховатости $R_a = 0,9\text{--}2$ мкм, что соответствует зеркальному уровню поверхности ($R_a \leq 1,25$ мкм по ГОСТ 2789-73 [3]) и превосходит возможности механической обработки.

Однако данный метод характеризуется высокой агрессивностью химического воздействия, что требует непрерывного визуального контроля продолжительности обработки для предотвращения деградации геометрии. Важным ограничением является существенное ухудшение детализации модели (сглаживание мелких элементов и кромок), поэтому технология не рекомендуется для высокоточных или функционально нагруженных конструкций с тонкими стенками или сложной топологией.

Одним из наиболее универсальных методов химической постобработки FDM-изделий является нанесение дихлорметана (ДХМ, CH_2Cl_2) на поверхность, обеспечивающее частичное растворение верхнего слоя полимера с формированием гомогенной глади. Данное хлорированное органическое соединение характеризуется высокой химической совместимостью с ABS-пластиком и умеренным взаимодействием с PLA, PETG и аналогичными материалами, что приводит к контролируемому оплавлению экструдированного слоя при сохранении общей геометрии детали.

В отличие от паровой ацетоновой обработки, ДХМ-воздействие носит локальный точечный характер (кистью или распылением), что обеспечивает избирательное разглаживание, но сопряжено с риском неоднородности профиля (локальные перепады высот до 10-20 мкм) при отсутствии последующей механической доводки. Оптимальные результаты достигаются при комбинированном подходе: нанесение ДХМ с последующим шлифованием. Например, для PLA-образцов, напечатанных с высотой слоя 0,2 мм, прямое нанесение ДХМ обеспечивает $R_a = 20\text{--}26$ мкм (среднее 23 мкм), тогда как двухэтапная обработка ДХМ + шлифовка снижает шероховатость до $R_a = 14\text{--}19$ мкм (среднее 16,5 мкм).

Механизм улучшения обусловлен фазовым переходом верхнего слоя полимера в вязкую фазу с последующим выравниванием неровностей и механическим удалением выступов, что демонстрирует синергетический эффект химико-механической обработки (снижение R_a на 25-30% по сравнению с монометодами). Рекомендуется выдержка 5-15 мин после нанесения ДХМ с контролем толщины пленки для минимизации деградации тонкостенных элементов.

Отдельно хочется отметить четырёхэтапную постобработку, заключающуюся в обработке ДХМ, шлифовании, вскрытии мелкодисперсной шпаклёвки и финишном шлифовании. Данный метод можно считать самым затратным по времени, но он даёт наиболее приятный, визуальный результат. Суть метода сочетает в себе многие положительные качества вышеупомянутых методов, но применим в большей мере лишь к декоративным изделиям и изделиям, не испытывающим нагрузки. На первом этапе расплавляется верхний слой, позволяющий на втором этапе наждачной убрать наиболее грубые и острые выступы, значительно усреднив поверхность; третий этап подразумевает нанесение тонкого слоя шпаклёвки, для заполнения пор и углублений изделия, позволяя на замыкающем этапе привести перепады поверхности к среднему значению. Благодаря этому можно постепенно уменьшать шероховатость используя более мелкозернистый абразивный инструмент, получая интересующую шероховатость в широком диапазоне.

На основании вышеизложенной информации и измерений можно составить примерный диапазон применения методов улучшения поверхности деталей при FDM 3D печати и представить в следующем виде:

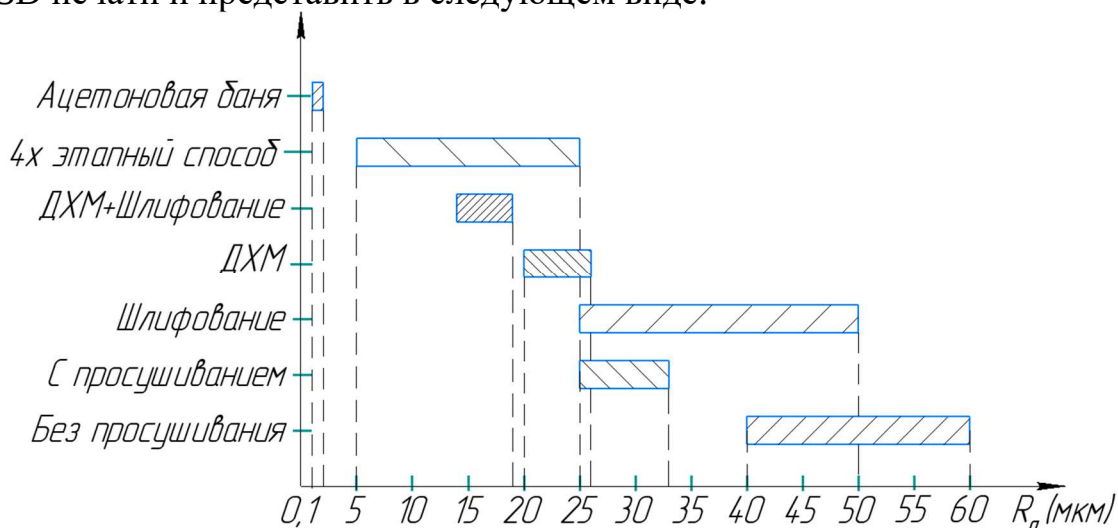


Рис. 2. График усреднённых диапазонов зависимости шероховатости от метода улучшения поверхности

Таким образом можно сделать вывод об эффективности комбинации базовых методов и постобработки для улучшения качества поверхности FDM-изделий. Уменьшение высоты слоя с 0,2 до 0,12 мм и сушка филамента снижают шероховатость R_a на 42% (с 50 до 29 мкм), а химическая обработка (ДХМ, ацетон для ABS) и шлифовка доводят R_a до 0,9-19 мкм в зависимости от материала (ABS, PLA, PETG). Многоэтапная постобработка (ДХМ + шлифовка + шпаклевка) дает наилучший визуальный результат, но ограничена декоративными изделиями из-за трудозатрат и химических рисков.

Оптимально: сушка + низкая высота слоя для всех материалов; ДХМ-шлифовка для PLA/PETG; ацетоновая баня для ABS с контролем детализации. Дальнейшие исследования требуют статистику повторений и сравнение с инженерными нагрузками для аддитивного производства в CAD/образовании.

Список литературы

1. Тараховский А.Ю., Репинский Б.А. Влияние параметров 3D-печати на качество поверхности и точность деталей // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2025. – №16. – С. 40-44. – DOI: 10.26160/2541-8637-2025-16-40-44.
2. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2018. – 12 с.
3. Симачук А.С. Сравнение подходов к химической обработке моделей после 3D-печати // Обществознание и социальная психология. – 2022. – № 10(40). – С. 63-66.
4. Свиридов Д.А., Редькин Д.С., Подшибякин М.Е. Разработка комбинированного подхода обработки поверхностей изделий, полученных при помощи 3D-печати методом FDM // Современные материалы, техника и технологии. – 2024. – №3(54). – С. 49-53.
5. Potapov A.A., Volgin V.M., Malakho A.P., Gnidina I.V. Supplementary treatment of FDM printed parts. Review // Russian Chemical Reviews. 2024, vol. 93, no. 9, p. RCR5127. doi.org/10.59761/RCR5127.
6. Говоров И.С. Поверхностная обработка образцов, изготовленных методом FDM-печати // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 9. – С. 604-608. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-9-604-605.
7. Тараховский А.Ю. Формирование нового поколения инженеров-конструкторов: интеграция 3D моделирования и аддитивных технологий в образовательные программы // Современные тенденции развития фундаментальных и прикладных наук: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции, Брянск, 25 января 2025 года. – Брянск: Брянский государственный инженерно-технологический университет, 2025. – С. 622-631.

Сведения об авторах:

Тараховский Алексей Юрьевич – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Цифровое проектирование»;

Репинский Богдан Александрович – ассистент кафедры «Цифровое проектирование».