

Научная статья
УДК 678.01:541.64

ХИМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ, ОТВЕРЖДЕННЫХ КАРДАНОЛСОДЕРЖАЩИМ ОТВЕРДИТЕЛЕМ, ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Алексей Евгеньевич Шкуро¹, Руслан Альбертович Вазиров²,
Степан Михайлович Корж³, Дарья Сергеевна Валеева⁴

^{1, 4} Уральский государственный лесотехнический университет,
Екатеринбург, Россия

^{2, 3} Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ shkuroae@m.usfeu.ru

² vazirov23@gmail.com

³ stepan.korzha@urfu.ru

⁴ valeevad2006@gmail.com

Аннотация. Исследована радиационная и химическая стойкость эпоксидного материала на основе возобновляемого карданола из скорлупы кешию. Установлено, что облучение электронным пучком (0–60 кГр) существенно влияет на устойчивость к агрессивным средам. Оптимальная доза 30 кГр повышает химическую стойкость за счет увеличения сшивки полимерной сети, тогда как 60 кГр вызывает деградацию.

Ключевые слова: эпоксидная смола, химическая стойкость, отвердитель, Кардамин-Д, карданол, возобновляемое сырье, электронный пучок

Для цитирования: Химическая стойкость эпоксидных смол, отвержденных карданолсодержащим отвердителем, после облучения электронным пучком / А. Е. Шкуро, Р. А. Вазиров, С. М. Корж, Д. С. Валеева // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса = Effective reaction to modern challenges of the interaction between human and nature, human and technologies : материалы XVII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург : УГЛТУ, 2026. С. 498–502.

Original article

CHEMICAL RESISTANCE OF EPOXY RESINS CURED WITH CARDANOL-CONTAINING HARDENER AFTER ELECTRON BEAM IRRADIATION

**Alexey E. Shkuro¹, Ruslan A. Vazirov², Stepan M. Korzh³,
Daria S. Valeeva⁴**

^{1,4} Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russia

^{2,3} Ural Federal University named after the first President
of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ shkuroae@m.usfeu.ru

² vazirov23@gmail.com

³ stepan.korzh@urfu.ru

⁴ valeevad2006@gmail.com

Abstract. The radiation and chemical resistance of an epoxy material based on renewable cardanol from cashew shells was researched. Electron beam irradiation (0–60 kGy) was found to significantly improve resistance to aggressive environments. An optimal dose of 30 kGy improves chemical resistance by increasing cross-linking of the polymer network, while 60 kGy causes degradation.

Keywords: epoxy resin, chemical resistance, hardener, Cardamine-D, cardanol, renewable raw materials, electron beam

For citation: Khimicheskaya stoykost epoksidnykh smol. otverzhdennykh kardanolsoederzhashchim otverditelem. posle oblucheniya elektronnyim puchkom. [Chemical resistance of epoxy resins cured with cardanol-containing hardener after electron beam irradiation] (2026) A. E. Shkuro, R. A. Vazirov, S. M. Korzh, D. S. Valeeva (2026) Effektivnyi otvet na sovremennye vyzovy s uchetom vzaimodeistviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologii [Effective reaction to modern challenges of the interaction between human and nature, human and technologies : materials of the XVII International Scientific and Technical Conference]. Ekaterinburg : USFEU, 2025. P. 498–502. (In Russ).

Традиционно для отверждения эпоксидных смол применяют такие отвердители, как полиэтиленполиамины (ПЭПА), циклоалифатические и ароматические амины. Однако эти вещества обладают существенными недостатками, включая высокую токсичность, резкий аминовый запах и необходимость высокотемпературного режима отверждения. В отличие от них, феналкамины – карданолсодержащие основания Манниха – лишены этих ограничений и представляют собой перспективную альтернативу традиционным отвердителям.

Связующие композиции на основе фенолкаминов демонстрируют ряд преимуществ: использование возобновляемого сырья при синтезе, низкая вязкость, пониженная токсичность (относятся к 3–4 классу опасности), высокая адгезионная способность к различным поверхностям, устойчивость к химическим воздействиям, а также способность отверждать эпоксидные смолы при температурах ниже 0 °С.

Объектом исследования выступала эпоксидная смола, отвержденная Кардамином-Д производства ПАО «Улалхимпласт». Данный отвердитель относится к классу фенолкаминов – соединений, представляющих собой основания Манниха, синтезированные путем конденсации алифатических аминов с формальдегидом и карданолом.

Карданол, являющийся ключевым возобновляемым компонентом, выделяется из жидкости скорлупы орехов кешью (ЖСОК) – побочного продукта переработки орехов кешью. Технология получения Кардамина-Д включает реакцию взаимодействия диэтилентриамина с техническим карданолом и формальдегидом при температуре 70 °С с последующей отгонкой воды при 85 °С в условиях вакуума.¹ Использование возобновляемого сырья и специфическая химическая структура придают отвердителю и конечному материалу комплекс ценных эксплуатационных характеристик.

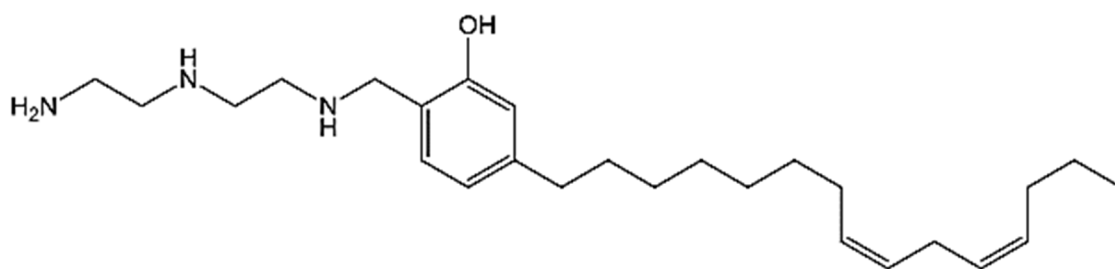


Рис. 1. Структурная формула Кардамина-Д [1]

¹ Тесленко А. Ю., Шишлов О. Ф., Глухих В. В. Изучение влияния эпоксидной смолы на физико-механические свойства древесно-слоистого пластика с карданолсодержащим основанием Манниха // Актуальные проблемы науки о полимерах : Сборник трудов II Всероссийской научной конференции (с международным участием) преподавателей и студентов вузов, Казань, 25–26 мая 2021 года. Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2021. С. 123–124.

Teslenko A. Yu., Shishlov O. F., Glukhikh V. V. Study of the influence of epoxy resin on the physicomechanical properties of wood-laminated plastic with a cardanol-containing Mannich base // Actual problems of polymer science : Collection of works of the II All-Russian scientific conference (with international participation) of teachers and students of universities, Kazan, May 25–26, 2021. Kazan : Kazan National Research Technological University, 2021. P. 123–124.

Образцы отвержденной эпоксидной смолы подвергались облучению электронным пучком с энергией 0,5 МэВ. Облучение образцов проводилось на линейном ускорителе УРТ-0.5. Варьирование дозы от 10 до 60 кГр достигалось путем изменения длительности экспозиции облучения. Контроль за величиной поглощенной дозы осуществлялся при помощи сополимерных цветковых дозиметров СО ПД 5/50, ВНИИФТРИ. Для достижения однородности распределение дозы облучения производилось с двух сторон.

Для определения химической стойкости исследуемые образцы в форме параллелепипедов размерами 15×5×5 мм помещались в контейнеры с 10 %-ными растворами NaOH и HCl. Время непрерывного экспонирования в агрессивных средах составляло 240 ч. После этого образцы извлекались из растворов и взвешивались. Затем сушились до постоянной массы и снова взвешивались. Таким образом сначала определялось набухание (Δm_1) образцов в агрессивной среде, а затем потеря массы (Δm_2). Результаты испытаний приведены на рис. 2 и 3.

На основе анализа данных по изменению массы образцов в агрессивных средах после облучения можно сделать следующие выводы. Поглощение раствора (набухание) в среде NaOH с ростом дозы облучения до 30 кГр снижается с 3,7 % до 1,2 %, что свидетельствует об уплотнении и увеличении степени сшивки полимерной сети под действием радиации. Улучшение стойкости в щелочной среде происходит, вероятно, благодаря дополнительной сшивке по двойным связям карданола на поверхности образца, инициированной облучением быстрыми электронами. Этот процесс приводит к формированию более плотной и химически устойчивой поверхностной структуры. Однако при дозе 60 кГр набухание вновь возрастает до 3,2 %, что указывает на начало деструктивных процессов и преобладание разрушения сетки над процессами сшивания.

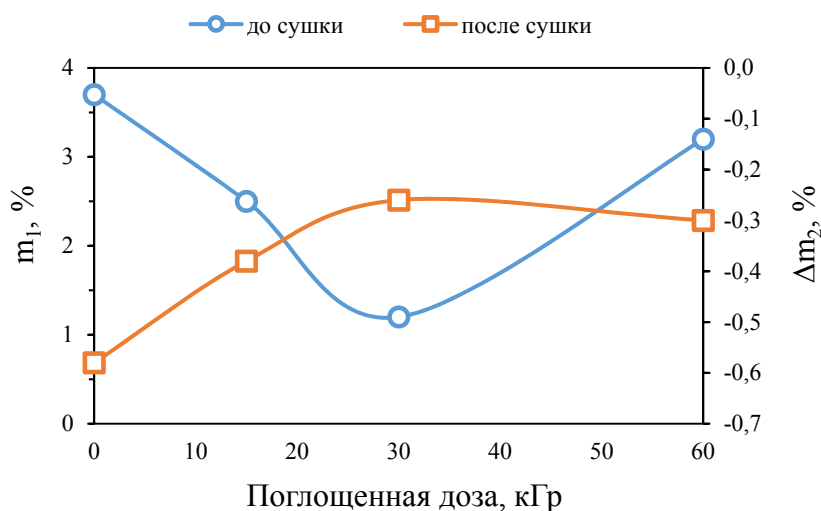


Рис. 2. Изменение массы образцов отвержденной Кардаминол-Д эпоксидной смолы после экспонирования в 10%-ном растворе NaOH

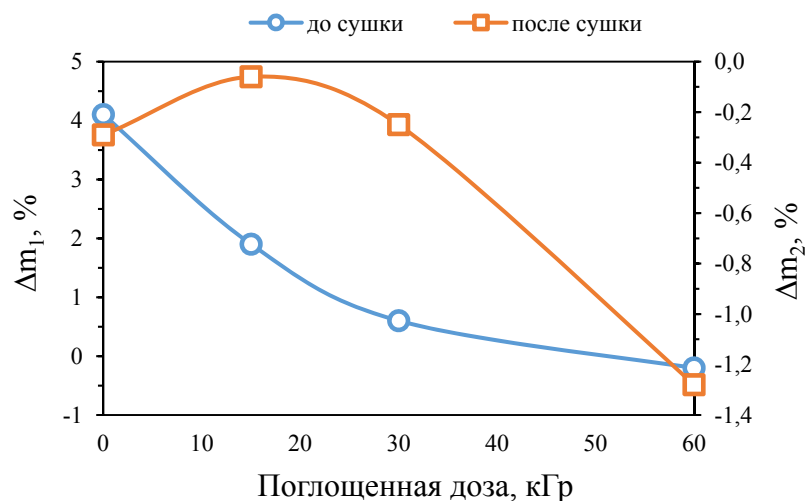


Рис. 3. Изменение массы образцов отвержденной Кардаминол-Д эпоксидной смолы после экспонирования в 10%-ном растворе HCl

В среде HCl наблюдается более выраженная тенденция к снижению набухания вплоть до отрицательного значения ($-0,2 \%$ при 60 кГр), что говорит о непосредственной потере массы материалом. Потеря массы после сушки, непосредственно характеризующая химическую стойкость, является незначительной для NaOH на всех дозах (менее 0,6 %) и демонстрирует высокую устойчивость материала к щелочной среде. Для HCl потеря массы также остается очень низкой при дозах до 30 кГр, но резко возрастает до 1,28 % при облучении в 60 кГр.

Различие в механизме воздействия сред объясняется разным размером и подвижностью ионов: ионы водорода (H^+) из HCl являются более маленькими и подвижными, поэтому они способны глубже проникать в структуру материала даже через мельчайшие дефекты, которые образуются под действием быстрых электронов. В результате кислота действует по всему объему материала, вызывая его объемную деградацию при высокой дозе облучения, повреждающей полимерную сеть. Более крупные ионы гидроксила (OH^-) из NaOH преимущественно атакуют поверхность, что приводит к менее выраженному и более поверхностному разрушению. Формирование дополнительной сшитой структуры на поверхности под действием облучения как раз и эффективно против такого поверхностного воздействия щелочи.

Таким образом, оптимальной дозой облучения, повышающей химическую стойкость Кардамина-Д, является 30 кГр. Материал демонстрирует выдающуюся стойкость к щелочи на всех дозах и высокую стойкость к кислоте, которая, однако, критически снижается при высокой дозе облучения 60 кГр из-за радиационной деструкции и последующего объемного разрушения под действием подвижных ионов водорода.