

УДК 620.22

ЭКОУСТОЙЧИВЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Корниенко Н.А., Тимофеюк Д.К., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники¹
г. Минск, Республика Беларусь

Дорошевич И. Л. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В данной статье рассматриваются экоустойчивые и возобновляемые материалы, их классификация, свойства и перспективы применения. Анализируются нанокристаллическая целлюлоза, упрочнённая древесина, биоклеи, водорослевые электрохимические накопители энергии, биопластики и биоразлагаемые полимеры, а также экологически чистые строительные материалы. Сделан вывод об актуальности перехода к возобновляемым и перерабатываемым материалам в контексте устойчивого развития.

Ключевые слова. Возобновляемые материалы, экоустойчивость, биопластики, нанокристаллическая целлюлоза, упрочнённая древесина, биоразлагаемые полимеры, биоклеи, водоросли, переработка, строительные материалы.

1. Введение

Строительная отрасль и промышленность в целом оказывают значительное воздействие на окружающую среду. По различным оценкам, производство цемента – основного компонента бетона – обеспечивает около 8 % мировых выбросов углекислого газа CO₂. Добыча природных ресурсов, таких как древесина, ведёт к вырубке лесов и нарушению экосистем [6]. В связи с этим в мировом научном сообществе нарастает интерес к экоустойчивым и возобновляемым материалам – таким, которые получают из природных источников, способных естественным образом восстанавливаться, либо которые могут быть переработаны и использованы повторно [4].

Возобновляемые материалы – это материалы, получаемые из природных источников, способных восстанавливаться в течение относительно короткого времени. Перерабатываемые строительные материалы – это те, которые могут быть собраны, обработаны и повторно использованы после завершения их первоначального жизненного цикла [4]. Оба подхода являются ключевыми инструментами перехода к экономике замкнутого цикла и позволяют существенно снизить нагрузку на природные ресурсы.

2. Нанокристаллическая целлюлоза как перспективное сырьё

Целлюлоза является основным компонентом лигноцеллюлозной биомассы растений и составляет приблизительно 40–45 % от массы древесины. На её основе получают нанокристаллическую целлюлозу (НКЦ) – материал с уникальными механическими, оптическими и барьерными свойствами [1].

Нанокристаллическая целлюлоза (НКЦ) – это высокоориентированные кристаллические фрагменты целлюлозы с поперечными размерами от 5 до 50 нм и длиной от нескольких десятков до нескольких сотен нанометров, получаемые кислотным гидролизом аморфных областей целлюлозных волокон.

Поясним основные параметры: поперечный размер определяет удельную площадь поверхности материала и его реакционную способность; кристалличность влияет на механическую прочность и прозрачность получаемых нанокомпозитов. НКЦ находит применение в энергетических устройствах, электронике, биомедицинских изделиях [1].

Одним из главных недостатков производства нанокристаллической целлюлозы являются трудности экономически выгодного возврата кислот, использованных в процессе гидролиза [1]. Тем не менее перспективы применения данного материала весьма широки: он может использоваться как армирующий наполнитель для биоразлагаемых полимерных матриц, в барьерных плёнках для упаковки, а также в фотонных и сенсорных устройствах.

3. Упрочнённая древесина

Традиционная древесина является возобновляемым строительным материалом, однако обладает относительно невысокой твёрдостью по сравнению с металлами. Современные технологии позволяют путём химической обработки и горячего прессования превращать природную древесину в упрочнённую древесину (УД) с кратным увеличением механических характеристик [1].

Процесс получения УД включает несколько стадий: химическую обработку для частичного удаления лигнина, холодное прессование с одновременной горячей сушкой, а также пропитку маслом для стабилизации структуры. В результате число Бринелля у упрочнённой древесины достигает 31,21 по сравнению с 1,32 у натуральной бальсудовой древесины, что соответствует увеличению твёрдости в 23 раза [1].

Твёрдость по Бринеллю (*НВ*) определяется по формуле:

$$НВ = 2F / (\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})), \quad (1)$$

где F – прилагаемая нагрузка (Н); D – диаметр шарика-индентора (мм); d – диаметр отпечатка (мм).

Таким образом, большее значение НВ означает более высокое сопротивление материала пластической деформации.

УД обладает исключительными механическими свойствами и, в отличие от металлов, не подвержена коррозии. Гвозди из упрочнённой древесины по несущей способности сопоставимы со стальными гвоздями аналогичного размера, при этом превосходят их по показателям устойчивости к ржавлению, возобновляемости и лёгкости [1]. Это открывает широкие перспективы для замены металлических крепежных элементов в строительстве и мебельной промышленности.

4. Биоклеи на основе возобновляемого сырья

Синтетические адгезивы на нефтяной основе широко применяются в промышленности, однако оказывают негативное воздействие на окружающую среду. Перспективным направлением является разработка биоклеев – адгезивных материалов из возобновляемых источников [1].

Ключевые строительные блоки для создания биоклеев включают три группы компонентов [1]:

– растительные масла, придающие адгезиву гидрофобность и улучшающие влагостойкость конечного материала;

– биополимеры (белки, полисахариды, лигнин и др.), обеспечивающие адгезионные и когезионные свойства;

– мономеры, например итаконовая кислота, используемые для синтеза биоразлагаемых полимерных связующих.

Данные компоненты могут улучшать характеристики адгезивов на нефтяной основе или полностью заменять их. Особое место среди биополимеров занимает лигнин – природный ароматический полимер, обладающий высокой реакционной способностью и потенциалом в качестве основы для терморезистивных связующих [1].

5. Водорослевые электрохимические накопители энергии

Водоросли представляют собой доступное, дешёвое и экологически безопасное возобновляемое сырьё. Показательным направлением их использования является создание электрохимических накопителей энергии (ЭНЭ) [1].

Четыре основных компонента устройств ЭНЭ – электрод, связующее, электролит и мембрана – могут быть получены из водорослей или материалов на их основе. Так, карбонизация морских водорослей при высоких температурах позволяет получать пористые углеродные электродные материалы с развитой удельной поверхностью [1].

Удельная ёмкость суперконденсатора определяется выражением:

$$C = I \cdot \Delta t / (m \cdot \Delta V), \quad (2)$$

где I – ток разряда (А); Δt – время разряда (с); m – масса активного материала электрода (г); ΔV – рабочий диапазон напряжений (В). Таким образом, высокая удельная ёмкость достигается при развитой поверхности электрода, что обеспечивается пористой структурой карбонизованных водорослей.

Помимо электродов, из водорослей на основе полисахарида агара и каррагинана получают гелевые электролиты и разделительные мембраны. Применение водорослей в ЭНЭ позволяет создавать устройства с низкими материальными затратами и минимальным экологическим следом [1].

6. Биопластики и биополимеры

Пластик является одним из наиболее востребованных материалов на планете. Его производство к 2020 году превысило 367 млн тонн в год, однако накопление пластиковых отходов в окружающей среде стало серьёзной экологической проблемой [1, 5].

Биопластики классифицируют по двум ключевым критериям: по типу исходного сырья (возобновляемое или ископаемое) и по способности к биоразложению [5]. Согласно данной классификации выделяют четыре группы:

1. Небиоразлагаемые пластики из ископаемого сырья (традиционные полимеры: ПЭ, ПП, ПВХ и др.);

2. Биоразлагаемые пластики из ископаемого сырья (полибутираты PBAT, Полибутиленсукцинаты PBS, поливиниловый спирт PVAL и др.);

3. Небиоразлагаемые пластики на основе природного сырья (биополиэтилен, биоПВХ);

4. Биоразлагаемые пластики из природного сырья (крахмальные биополимеры группы 4а, PHA группы 4б, PLA группы 4в) [5].

Биоразложение – это вызванный биологической деятельностью процесс изменения химической структуры материала, приводящий к получению натуральных конечных продуктов обмена веществ [5]. Различают два вида биоразложения: аэробное разложение (компостирование), при котором продуктами являются CO_2 , вода и биомасса, и анаэробное разложение (биогазификация), дающее метан, воду и биомассу [5].

Необходимо учитывать, что конкретные условия, требуемые для биodeградации биопластиков (температура, pH, влажность), не всегда достижимы на обычных полигонах твёрдых бытовых отходов [1]. Это обуславливает необходимость создания специализированных установок для компостирования биополимерных изделий.

Среди природных полисахаридов наибольшее распространение в производстве биоразлагаемой упаковки получили крахмал, хитозан и целлюлоза. Вспененные материалы на основе крахмала применяются в качестве звукоизолирующей упаковки; плёнки на основе хитозана используются в пищевой промышленности как защитные покрытия [5].

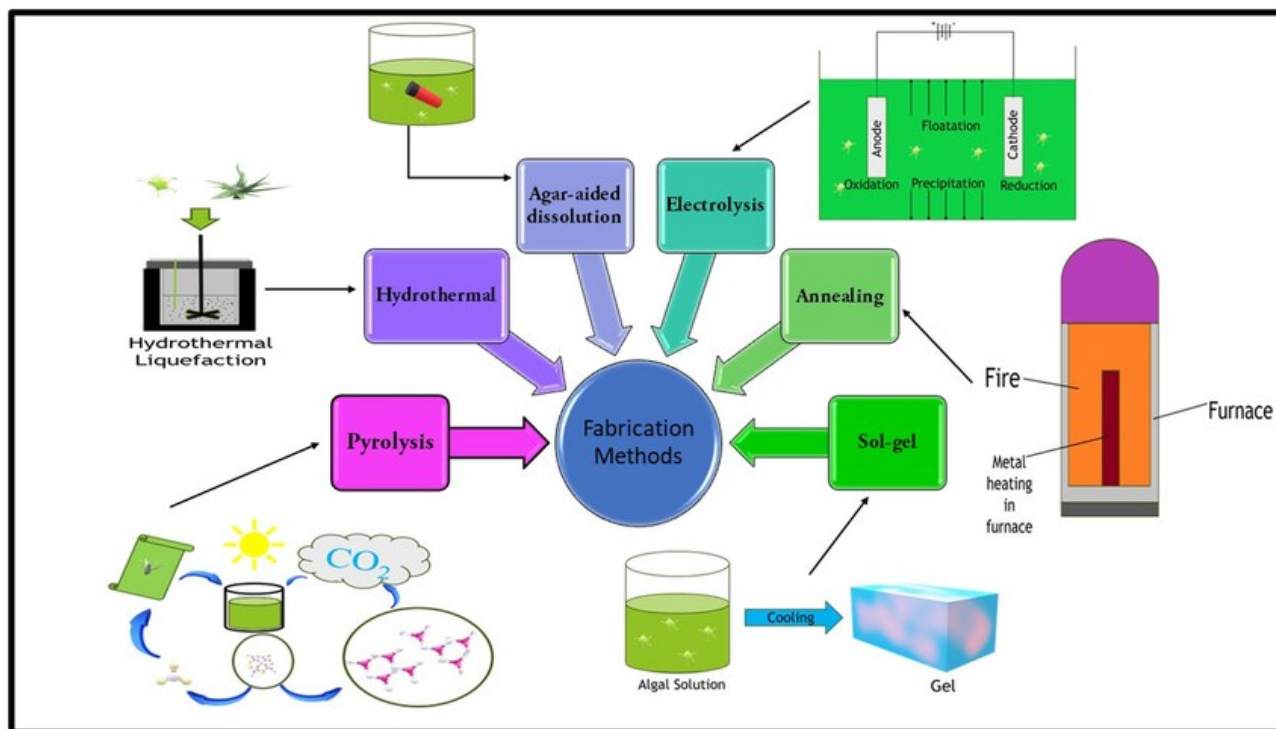


Рисунок 1 – Методы фабрикации компонентов батарей на основе водорослей [7].

7. Экологически чистые строительные материалы

Использование возобновляемых и перерабатываемых материалов в строительстве приобретает всё большую актуальность. К возобновляемым строительным материалам относятся восстановленная древесина, бамбук, растительные волокна [4].

К числу важнейших преимуществ возобновляемых строительных материалов относятся [4]:

- Экологическая устойчивость – снижение нагрузки на истощаемые ресурсы;
- Сниженный углеродный след – при рациональном лесопользовании выбросы CO₂ минимизируются;
- Биологическая разложимость – после окончания срока службы материалы разлагаются естественным образом;
- Эстетические и теплоизоляционные свойства (особенно характерно для древесины).

Вместе с тем возобновляемые материалы имеют ряд ограничений: некоторые из них, например бамбук и солома, обладают меньшей механической прочностью и жёсткостью, чувствительны к влаге и перепадам температур, требуют специальной обработки [4].

Перерабатываемые строительные материалы – металлические изделия (сталь, алюминий), стекло, бетон – позволяют создавать экономику замкнутого цикла. Переработка требует меньше энергии и затрат, чем первичное производство, и существенно сокращает количество отходов [4]. Особенно показательна практика Японии, где практически полностью перерабатываются строительные отходы.

Экологически чистые строительные материалы нового поколения включают: пенобетон с превосходными теплоизоляционными характеристиками, биодинамический бетон, поглощающий вредные вещества из воздуха, самовосстанавливающийся цемент с бактериями-продуцентами известняка, арболит на основе опилок и цемента [6]. Помимо этого, перспективным направлением являются экологически чистые отделочные материалы: известь, обладающая природными антисептическими свойствами, паропроницаемая и препятствующая развитию патогенной микрофлоры в жилых помещениях [7].

8. Новые экологически чистые строительные материалы на основе кожевенных отходов

Проблема нехватки традиционных сырьевых ресурсов для строительных материалов обусловила необходимость использования многочисленных отходов производства. Одним из перспективных направлений является создание строительных материалов с использованием кожевенной стружки в качестве наполнителя и фосфогипса в качестве связующего [2].

Разработанная серия теплоизоляционных материалов имеет коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,07...0,085$ Вт/(м·К) и объёмную массу $\gamma = 200...250$ кг/м³, что позволяет применять их для утепления чердачных перекрытий [2].

Коэффициент теплопроводности λ характеризует способность материала передавать тепло. Чем меньше λ , тем лучше теплоизоляционные свойства материала. Для сравнения: у минеральной ваты $\lambda \approx 0,035-0,050$ Вт/(м·К), у пенобетона – $0,10-0,14$ Вт/(м·К).

Декоративно-акустические плиты на основе кожевенных отходов и гипсового связующего обладают следующими характеристиками: объёмная масса $350...600$ кг/м³, предел прочности при сжатии $15...32$ МПа, предел прочности при изгибе $5...10$ МПа, коэффициент теплопроводности $0,08...0,13$ Вт/(м·К), отсутствие самостоятельного горения [2].

Санитарно-химическая оценка разработанных материалов показала, что показатель суммарной токсичности $T\Sigma$ не превышает единицы, что свидетельствует об их пригодности для использования в жилых и производственных зданиях [2].

9. Заключение

Проведённый анализ показывает, что возобновляемые и экоустойчивые материалы представляют собой одно из наиболее перспективных направлений современного материаловедения и строительной индустрии. Использование растительной биомассы – целлюлозы, лигнина, крахмала, водорослей – открывает возможности для создания широкого спектра материалов с заданными свойствами [1].

Упрочнённая древесина, биоклеи, водорослевые электрохимические накопители и биопластики демонстрируют конкурентоспособные характеристики при значительно меньшем экологическом следе по сравнению с традиционными аналогами [1, 5]. Вместе с тем полноценное экологически чистое производство в крупных масштабах пока не реализовано, а создание специализированных объектов для утилизации биопластиков требует решения ряда организационных и технологических задач [1, 4].

Комплексный подход к применению возобновляемых материалов, включая повторное использование отходов производства (кожевенная стружка, фосфогипс), позволяет не только снизить нагрузку на окружающую среду, но и создать экономически эффективные строительные материалы с требуемыми физико-механическими и санитарно-гигиеническими характеристиками [2].

Список использованных источников:

1. *Renewable materials* / Мороз К.К. [и др.]. – Презентация студентов 2 курса 8 группы БНТУ, 2024.
2. Воробьев Ю.В. Новые экологически чистые строительные материалы / Ю.В. Воробьев, Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, И.В. Рогов // Вестник ТГУ. – 1997. – Т. 2, вып. 1. – С. 83–87.
3. *Современные материалы: многофункциональные материалы, возобновляемые материалы (биоматериалы), пластика и керамика как альтернатива металлам.* – Презентация БНТУ, 2024.
4. Езерская Д.Д. Использование возобновляемых и перерабатываемых материалов в строительстве / Д.Д. Езерская; науч. рук. Л.М. Слепнёва // Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2025. – С. 96–99.
5. Мазитова А.К. Биоразлагаемые полимерные материалы и модифицирующие добавки: современное состояние. Часть II / А.К. Мазитова, Г.К. Аминова, И.И. Зарипов, И.Н. Вихарева // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Т. 13, № 1. – С. 32–38. – DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-1-32-38.
6. Бабакаева К.Е. Использование экологически чистых материалов в строительстве / К.Е. Бабакаева, Г.А. Кровяков; науч. рук. Н.В. Гилязидинова // XVI Всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных «Россия Молодая». – Кемерово, 2024. – 063207.
7. *Algae-based Electrochemical Energy Storage devices* / A. Ehsani [et al.] // ResearchGate, 2020. – Vol. 22, iss. 23. – P. 8062–8096

UDC 620.22

SUSTAINABLE AND RENEWABLE MATERIALS

Korniyenko N.A., Timofeyuk D.K., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Doroshevich I.L. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. This article examines sustainable and renewable materials, their classification, properties, and application prospects. It analyzes nanocrystalline cellulose, densified wood, bio-adhesives, algal electrochemical energy storage devices, bioplastics and biodegradable polymers, as well as eco-friendly building materials. A conclusion is drawn regarding the relevance of transitioning to renewable and recyclable materials in the context of sustainable development.

Keywords. Renewable materials, sustainability, bioplastics, nanocrystalline cellulose, densified wood, biodegradable polymers, bio-adhesives, algae, recycling, building materials.