

К вопросу экологической безопасности конструкционных материалов

В.П. Дмитренко, заведующий кафедрой, профессор, д-р техн. наук

Н.Б. Мануйлова, доцент, канд. техн. наук

С.Н. Булычев, доцент, канд. техн. наук

С.И. Горбачев, доцент, канд. техн. наук

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

e-mail: dmitrenkovpd@mail.ru, silen21@mail.ru, bulychovsn@yandex.ru, gor-sergey1@yandex.ru

Ключевые слова:

конструкционные материалы,
оценка воздействия на окружающую среду,
оценка экологической безопасности материала,
критерий экологической эффективности материала,
индекс экологической безопасности материала,
окружающая среда.

Рассмотрены вопросы оценки экологической безопасности конструкционных материалов с учетом стадий полного жизненного цикла изделий. Описаны принципы оценки воздействия материалов на окружающую среду. Степень экологической безопасности материала предложено описывать с помощью двух критериев: индекса экологической безопасности материала и экологической эффективности материала. Первый представляет собой экологическую характеристику материала безотносительно к его применению в конкретном изделии и без учета технологии переработки. Применение данного критерия позволит сравнивать экологические свойства как родственных, так и разнородных материалов. Второй учитывает степень воздействия материала на окружающую среду на всех стадиях жизненного цикла изделия. Применение данного критерия позволит уточнить окончательный выбор материала с учетом технологии его переработки и социально-экономических факторов производства.

1. Введение в проблему

Современная цивилизация не может существовать без создания новых материалов, применяемых в разных отраслях экономики — от строительства, транспорта и машиностроения до медицины. Именно материал определяет ту или иную технологию получения и переработки в изделия [1]. Вопрос экологической безопасности конструкционных материалов в течение полного жизненного цикла (ЖЦ) становится актуальным. Рост требований к экологической безопасности материалов, изделий и конструкций должен вести к достижению максимальной комфортности и высокой безопасности для здоровья человека и окружающей среды (ОС). Очевидно, что улучшение экологических свойств изделий должно быть экономически выгодным, хотя это вызывает дополнительные затраты на разработку новых материалов и совершенствование технологий. Для решения этой

задачи логично ориентировать науку на разработку альтернативных производственных процессов, которые удовлетворяли бы требованию рационального использования сырья и энергии и замкнутости процесса в границах производства, обеспечивая сходные или меньшие расходы по сравнению с базовыми технологиями. Это нашло выражение в ряде нормативно-правовых документов [2–5].

Для сравнительной оценки экологичности (степени воздействия на ОС) материала и (или) технологического процесса (ТП) необходимы соответствующие критерии оценки. Однако не существует не только единого критерия, позволяющего сравнить экологичность различных материалов, но и методики комплексной оценки материалов и (или) технологий по группе показателей. Применяется достаточно широкое понятие «экологические свойства материала», под которым понимают свойства материала,

оказывающие влияние на ОС. Но для практического использования этого понятия необходимы научно обоснованный механизм и критерии оценки экологических свойств материалов.

Современный подход к выбору материала включает первичные требования, которые задаются исходя из служебного назначения изделия, а также вторичные требования, которые задаются исходя из технологических условий изготовления (например, свариваемость) и экономических характеристик. Выбор материала для производства изделия включает анализ номенклатуры материалов, подборку имеющих наилучшее сочетание эксплуатационных характеристик [6]. Однако при выборе материала практически не учитывают его воздействие на ОС. Критерии экологичности материала и (или) ТП помогут в выборе соответствующих показателей экологической эффективности [5].

2. Основные принципы оценки экологических свойств материалов

Наиболее эффективны при анализе воздействия материала на ОС на любой стадии ЖЦ могут быть подходы, основанные на базовых принципах оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) [2].

1. *Принцип потенциальной опасности любого материала.* Для ОС потенциально опасен любой материал, поэтому анализ экологического воздействия на ОС должен проводиться для каждого материала.
2. *Принцип системности.* Анализ экологической опасности материала должен проводиться на всех этапах ЖЦ материала, начиная с добычи сырья и заканчивая этапом утилизации.
3. *Принцип комплексности.* Если в конечном материале присутствуют несколько компонентов, например, как в случае композиционных материалов, то анализу должен подвергаться каждый компонент материала.
4. *Принцип предупреждения вредного воздействия.* При анализе необходимо исходить из недопущения (предупреждения) возможных неблагоприятных воздействий на ОС в течение ЖЦ, а также связанных с ними социальных, экономических и иных последствий.
5. *Принцип многовариантности.* При анализе воздействия материала на ОС необходимо рассматривать альтернативные варианты использования материала (альтернативные ТП) или другие материалы с аналогичными свойствами. Иными словами, должна быть предложена альтернатива материалу по экологическим показателям. Особенно это важно, если анализ воздействия материала на

ОС проводится на стадии разработки ТП. Такой подход позволит выявить, проанализировать и учесть экологические и иные связанные с ними последствия всех рассмотренных вариантов, а также нулевого варианта (отказ от использования).

6. *Принцип научной обоснованности и достоверности.* Результаты анализа воздействия материала на ОС должны быть научно обоснованы и достоверны.

3. Критерий экологической эффективности материала. Выбор оптимального материала

Единство структуры ЖЦ материала, постоянство перечня его стадий и их последовательности позволяют использовать единые подходы и методы анализа при оценке ЖЦ материала. Практическое инженерное применение оценки ЖЦ требует перехода от абстрактного качественного анализа к количественному. Последний должен опираться на использование конкретных численных показателей, характеризующих степень негативного воздействия материала на ОС на всех стадиях ЖЦ. Многообразие форм и видов воздействия материала на ОС на разных стадиях ЖЦ изделия и связанных с ними количественных показателей затрудняет проведение анализа экологической безопасности и препятствует практическому сравнительному анализу материалов между собой по экологическим показателям и выбору оптимального материала.

Перед технологами и конструкторами при экологической оценке материала стоит, по сути, задача многокритериальной оптимизации. Большое число технико-экологических и экономических параметров материала, требующих учета и выступающих критериями (многие из которых носят нестационарный и динамический характер), неизбежно приводит к необходимости применять принципы и методы системного анализа. Системный подход позволяет искать решение проблемы с учетом наличия сложных взаимосвязей между большим числом определяющих факторов. Согласно системному подходу [7] любая сложная система может быть формализована и представлена математически в виде определенного набора функций, описывающих системную динамику и являющихся математической моделью системы. В итоге применение системного подхода приводит к необходимости математического описания экологического воздействия материалов на ОС на разных стадиях ЖЦ, представляющих собой математическую модель его динамического взаимодействия с ОС.

Практическое использование экологоориентированной математической модели материала сводится

к решению многокритериальной задачи условной оптимизации, которая в общем виде может быть сформулирована следующим образом:

$$\min\{f_{\text{экол}}(x), f_{\text{экон}}(x), f_{\text{соц}}(x)\}, g_i(x_1, x_2, \dots, x_k) \leq b_i \\ \text{для всех } i = 1, \dots, k,$$

при которых достигается экстремум данных многомерных функций, где x — некоторый вектор решений, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$;

$f_{\text{экол}}(x)$ — совокупность факторов экологического вреда;

$f_{\text{экон}}(x)$ — совокупность экономических факторов, связанных с затратами на получение материала, себестоимостью изготовления изделия и затратами на утилизацию;

$f_{\text{соц}}(x)$ — целевая функция, включающая группу факторов, ориентированных на реализацию социальных потребностей общества;

$g_i(x_1, x_2, \dots, x_k) \leq b_i$ — набор некоторых ограничений, которым должен удовлетворять x .

Несмотря на кажущуюся простоту постановки задачи и наличие известных методов решения оптимизационных задач такого класса, однозначное решение не может быть достигнуто вследствие наличия тесных связей между целевыми функциями $f_{\text{экол}}(x)$, $f_{\text{экон}}(x)$, $f_{\text{соц}}(x)$, противоречий между ними, их разной значимости для человека и невозможности представления целевых функций в едином пространстве. Если $f_{\text{экол}}(x)$ и $f_{\text{экон}}(x)$, можно представить в едином пространстве с измерением в денежном выражении, то $f_{\text{соц}}(x)$ выходит за его рамки, так как социальные потребности человека и общества многообразны и разнородны (в том числе потребности в безопасности человека и обороноспособности государства, потребности духовного развития и т.п.). Естественные противоречия между группами экологических, экономических и социальных факторов, которые необходимо учитывать при выборе материала, приводят к тому, что попытка решить оптимизационную задачу в предлагаемой постановке приведет к большому числу формальных локальных решений, не учитывающих реально существующие связи и противоречия между целевыми функциями. Поэтому более эффективен переход от многомерной оптимизации к условной одномерной, в которой используется интегральная целевая функция, учитывающая наряду с экологическими экономические и социальные группы факторов (интересов). Задача имеет вид:

$$f_{\text{эк}}(x) \rightarrow \min, g_i(x_1, x_2, \dots, x_k) \leq b_i \\ \text{для всех } i = 1, \dots, k, \text{ при } x \in S,$$

где S — некоторая непустая область определения вектора решений x

Применение интегральной целевой функции $f_{\text{эк}}$ позволяет упростить задачу оптимизации и обеспечить возможность использовать формальные процедуры оптимизации для нахождения глобального минимума, соответствующего наименее тяжелым последствиям для ОС от применения материала в сочетании с оптимальной экономической эффективностью его использования, позволяющего добиться максимального социального эффекта. Целевая функция $f_{\text{эк}}$ должна удовлетворять ряду требований:

- обеспечивать оптимальный баланс между группами экологических, экономических и социальных требований к материалу изделия, т.е. служить компромиссом между экологичностью, потребностью в изделии со стороны общества и экономической рентабельностью его производства;
- содержать в своем составе конкретные математические зависимости, связывающие эколого-ориентированные факторы с социально-экономическими параметрами материалов, изделий и конструкций из них;
- $f_{\text{эк}}$ должна быть полноценной аналитической математической моделью материала и обеспечивать возможность получить конкретные численные результаты;
- иметь четкий алгоритм, с помощью средств стандартных языков программирования, так и систем компьютерной математики (Matlab, Maple, MathCad и др.);
- обеспечивать возможность применения наряду с традиционными математическими функциями экспертных оценок, что реализуется посредством использования разветвленной и структурированной системы весовых коэффициентов;
- описывать все стадии ЖЦ материала;
- быть применимой к анализу любых материалов (конструкционных, строительных, со специальными свойствами) и веществ.

В наиболее характерной постановке задачи необходимо определить характеристики материала (химический состав, исходное сырье, технологию получения, вид дополнительной обработки) для изготовления изделия с заданными характеристиками и способ получения изделия (способ и вид переработки материала в изделие, особенности технологии), что составляет вектор x . К набору ограничений будут относиться геометрические, механические и эксплуатационные характеристики изделия, срок службы, максимальная себестоимость, степень ремонтпригодности, особенности утилизации и вторичной пе-

переработки и другие факторы. В результате решения оптимизационной задачи должны быть определены материал и технология получения изделия, обеспечивающая минимум целевой функции $f_{эк}$.

Однако может возникнуть необходимость постановки и других видов задач оптимизации. Например, когда известно изделие с его характеристиками, есть технология производства и требуется выбрать из нескольких имеющихся доступных материалов оптимальный с точки зрения минимизации его воздействия на ОС на всех стадиях ЖЦ изделия. Или проектирование материала с заранее заданными свойствами (что характерно для современных композиционных материалов) для получения изделия с наивысшими эксплуатационными характеристиками при условии его экологической чистоты и способности к вторичной переработке. Другим примером будет выбор вида материала, из которого можно произвести требуемое изделие заданным способом (характерный пример — производство полимерных изделий методами литья под давлением) [8].

Многообразие необходимых видов постановки задач в инженерной практике и возможность проведения оценки экологической эффективности сырья, материалов, технологий и изделий инженерами и проектировщиками, не обладающими навыками решения сложных оптимизационных задач и не имеющими специфической математической квалификации, требует наряду с «академическим» подходом, приведенным выше, разработки более простого и доступного метода проведения анализа экологической эффективности материалов, но достаточно точного. В качестве такого метода инженерной оценки предлагается использовать критерий экологической эффективности материала (КЭЭМ) $K_{эф}$, который представляет собой величину, характеризующую степень воздействия материала на ОС на всех стадиях ЖЦ изделия с учетом достижения удовлетворительного социально-экономического эффекта от его производства. КЭЭМ вычисляется с использованием тех же подходов, что и целевая функция $f_{эк}$, и должен соответствовать всем предъявляемым к ней требованиям. Отличие состоит в том, что $K_{эф}$ имеет упрощенный алгоритм вычисления, основанный на более широком применении системы оценочных экспертных коэффициентов.

Наряду с КЭЭМ, который характеризует поведение и воздействие материала на ОС в составе конкретного изделия, предлагается использовать индекс экологической безопасности материала (ИЭБМ) $K_{и}$, представляющий собой экологическую характеристику материала безотносительно к его применению в конкретном изделии и без учета технологии переработки. ИЭБМ является константой для каждого материала

и зависит от исходного сырья, применяемого для изготовления материала, технологии его изготовления, особенностей самого материала и представляет собой сумму соответствующих коэффициентов:

$$K_{и} = K_{сырье} + K_{изг.мат.} + K_{мат.};$$

где: $K_{сырье}$ — характеризует экологическую безопасность сырья и его добычи; $K_{изг.мат.}$ — характеризует стадию изготовления исходного материала из сырья; $K_{мат.}$ — характеризует готовый материал с точки зрения экологической безопасности и воздействия на организм человека.

В зависимости от удобства анализа КЭЭМ и ИЭБМ можно представлять либо в форме безразмерного коэффициента (в долях от единицы), либо в процентном виде. Увеличение значений КЭЭМ и ИЭБМ указывает на увеличение потенциальной целесообразности применения данного материала, уменьшение — на снижение такой целесообразности. Величины $K_{и}$ и $K_{эф}$ могут принимать как положительные, так и отрицательные (в случае значительной экологической опасности материала) значения.

Применение КЭЭМ и ИЭБМ позволяет проводить инженерную оценку целесообразности использования того или иного материала без сложных расчетов. На начальной, грубой стадии отбора материала (сырья) можно использовать ИЭБМ и выбрать несколько потенциальных видов материалов, а далее использовать КЭЭМ для отбора наиболее экологически эффективного.

У каждого материала с точки зрения рационального природопользования есть определенный оптимальный для него спектр применения и способов переработки, в которых материал наиболее полно раскрывает свой потенциал. Поэтому очевидно, что необходимое (но недостаточное) условие эффективного использования материала для каждого конкретного случая или способа его переработки в изделие означает выполнение неравенства $K_{эф} \geq K_{и}$.

В самом общем виде $K_{эф}$ формируется из коэффициентов (расчетных блоков):

$$K_{эф} = K_{экол} + K_{экон} + K_{соц},$$

где: $K_{экол}$ — коэффициент экологической эффективности; $K_{экон}$ — коэффициент экономической эффективности; $K_{соц}$ — коэффициент социальной эффективности. Влияние коэффициентов (блоков) на комплексный показатель $K_{эф}$ регулируется весовыми коэффициентами, однако основным является блок $K_{экол}$, который формируется из ряда коэффициентов (расчетных блоков):

$$K_{\text{экол}} = K_{\text{сырье}} + K_{\text{изг.мат.}} + K_{\text{мат}} + K_{\text{проект}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{экспл}} + K_{\text{втор}}$$

где: $K_{\text{проект}}$ — характеризует стадию проектирования изделия или конструкции; $K_{\text{пр}}$ — характеризует стадию производства изделия; $K_{\text{экспл}}$ — характеризует стадию эксплуатации изделия; $K_{\text{втор}}$ — характеризует стадию утилизации и вторичной переработки изделия. Взаимосвязь между коэффициентами показана на рисунке.

5. Заключение

Научное направление, возникающее на стыке промышленной экологии, материаловедения, технологии машиностроительной отрасли, экономической и других наук, отвечает потребностям настоящего времени — повышение безопасности и комфортности жизни. Оценка воздействия материала на ОС, проведенная согласно изложенным принципам, обеспечит возможность комплексного анализа экологических параметров ЖЦ материала. Это позволит осуществлять выбор материала и оптимизацию ТП по экологическим показателям.

ИЭБМ представляет собой интегральную и универсальную характеристику конструкционного материала, что обеспечивает возможность сравнения экологических свойств, как родственных материалов, так и материалов, относящихся к разным классам. В итоге выбираются материалы, обладающие наименьшими значениями ИЭБМ. Окончательный выбор материала для изготовления изделия может быть сделан в результате применения более точного КЭЭМ, ориентированного не только на материал, но и на изделие, конструкцию, технологию изготовления и социально-экономические факторы. Входящие в КЭЭМ и ИЭБМ коэффициенты могут быть рассчитаны по сложным и разветвленным алгоритмам с учетом класса материала, технологического процесса, этапа ЖЦ и т.п. Методы и алгоритмы расчета этих коэффициентов мы планируем осветить в следующих статьях.

Обозначения

- S — некоторая непустая область определения вектора решений x ;
- x — вектор решений, размерность элементов вектора различная;
- $K_{\text{втор}}$ — безразмерный коэффициент, характеризующий стадию утилизации и вторичной переработки;
- $K_{\text{и}}$ — безразмерный индекс экологической безопасности материала;
- $K_{\text{изг.мат.}}$ — безразмерный коэффициент, характеризующий стадию изготовления исходного материала из сырья;
- $K_{\text{мат.}}$ — безразмерный коэффициент, характеризующий материал;
- $K_{\text{проект}}$ — безразмерный коэффициент, характеризующий стадию проектирования изделия или конструкции;
- $K_{\text{пр}}$ — безразмерный коэффициент, характеризующий стадию производства изделия;
- $K_{\text{сырье}}$ — безразмерный коэффициент, характеризующий безопасность сырья и его добычи;
- $K_{\text{соц}}$ — безразмерный коэффициент социальной эффективности;
- $K_{\text{экол}}$ — безразмерный коэффициент экологической эффективности;
- $K_{\text{экон}}$ — безразмерный коэффициент экономической эффективности;
- $K_{\text{экспл}}$ — безразмерный коэффициент, характеризующий стадию эксплуатации изделия;
- $K_{\text{эф}}$ — безразмерный критерий экологической эффективности материала;
- $f_{\text{соц}}(x)$ — совокупность факторов ориентированных на реализацию социальных потребностей общества;
- $f_{\text{экол}}(x)$ — совокупность факторов экологического вреда;
- $f_{\text{экон}}(x)$ — совокупность экономических факторов;
- $f_{\text{эк}}$ — интегральная целевая функция экологической эффективности с учетом социально-экономических факторов.

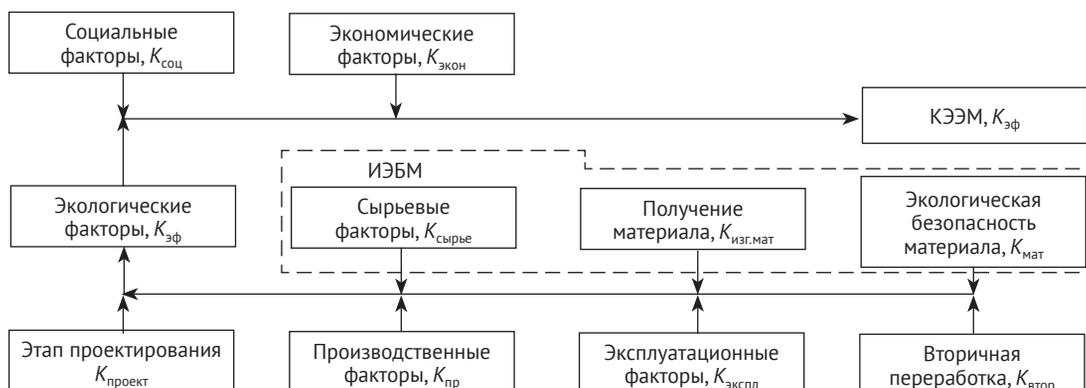


Рис. Принцип расчета КЭЭМ

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дмитренко В.П., Мануйлова Н.Б.* Материаловедение в машиностроении. Учебное пособие. — М.: НИЦ Инфра-М, 2016. — 432 с.
2. Приказ Госкомэкологии РФ от 16 мая 2000 г. № 372 «Об утверждении Положения об оценке воздействия намечаемой хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду в РФ».
3. Распоряжение Правительства РФ от 31 августа 2002 г. № 1225-р «Об Экологической доктрине Российской Федерации».
4. «Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года» (утверждены Президентом Российской Федерации 30 апреля 2012 г.).
5. ГОСТ Р ИСО 14040:2010 «Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура».
6. *Дмитренко В.П., Комбекова Г.А., Горбачев С.И., Булычев С.Н.* Современный подход к проектированию волокнистых полуфабрикатов термопластичных композиционных материалов // Пластические массы. 2005. № 5. С. 35–38.
7. *Белов П.Г.* Управление рисками, системный анализ и моделирование. — М.: Юрайт, 2015. — 728 с.
8. *Кривошеин Д.А., Дмитренко В.П., Федотова Н.В.* Основы экологической безопасности производств. СПб.: Лань, 2015.

REFERENCES

1. Dimitrenko V.P., Manuylova N.B. Materials in mechanical engineering. Tutorial. Moscow, INFRA-M Publ., 2016. 432 p. (in Russian)
2. Order of the State Committee on Ecology of the Russian Federation of May 16, 2000 № 372 «On Approval of the assessment will repayment of the planned economic and other activity on the environment in the Russian Federation.» (in Russian)
3. Russian Federation Government Decree dated August 31, 2002 № 1225-r «On Environmental Doctrine Russian Federation». (in Russian)
4. «Fundamentals of State Policy of the Russian Federation in the field of environmental development for the period till 2030» (approved by the President of the Russian Federation of April 30, 2012). (in Russian)
5. GOST R ISO 14040: 2010 «Environmental Management. Life cycle assessment. The principles and structure». (in Russian)
6. Dmitrenko V.P., Kombekova G.A., Gorbachev S.I., Bulychev S.N. Modern Approach to Designing NIJ-fiber semi-finished thermoplastic composite materials. Plastics. 2005, I. 5, pp. 35–38. (in Russian)
7. Belov P.G. Risk management, systems analysis and modeling. Moscow, Yurayt Publishing, 2015. 728 p. (in Russian)
8. Krivoshein D.A., Dmitrenko V.P., Fedotova N.V. Fundamentals of environmentally sound production. St. Petersburg, Publishing house «Lan», 2015. 336 p. (in Russian)

On the Question of Construction Materials' Environmental Safety

V.P. Dmitrenko, Doctor of Engineering, Professor, Head of Chair, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Moscow Aviation Institute" (National Research University)

N.B. Manuylova, Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Moscow Aviation Institute" (National Research University)

S.N. Bulychev, Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Moscow Aviation Institute" (National Research University)

S.I. Gorbachev, Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Moscow Aviation Institute" (National Research University)

The questions related to construction materials' environmental safety assessment taking into account products' overall lifecycle stages have been considered. Assessment principles of materials impact on the environment have been described. It has been proposed to describe the material's environmental safety degree using two criteria: material's environmental safety index and material's environmental efficiency criterion. The first one is the environmental characteristics of material, regardless of its use in a specific product, and excluding a treatment process. This criterion application allows compare the environmental properties both of kindred and dissimilar materials. The second one takes into account the material's impact on the environment at all stages of the product lifecycle. This criterion application will clarify the final selection of the material taking into account its treatment process to the product, and production's socio-economic factors.

Keywords: construction materials, environmental impact assessment, material's environmental safety assessment, material's environmental efficiency criterion, material's environmental safety index, environment.