

7. Honeychurch, K. C. Nanosensors for Chemical and Biological Applications [Text] / K. C. Honeychurch. — Birmingham: Woodhead Publishing, 2014. — 372 p. doi:10.1016/b978-0-85709-660-9.50014-x
8. Kolosov, A. E. Effective hardware for connection and repair of polyethylene pipelines using ultrasonic modification and heat shrinkage. Part 2. Production bases for molding of epoxy repair couplings with shape memory [Text] / A. E. Kolosov, O. S. Sakharov, V. I. Sivetskiy, D. E. Sidorov, S. O. Pristailov // Chemical and Petroleum Engineering. — 2011. — Vol. 47, № 3–4. — P. 210–215. doi:10.1007/s10556-011-9448-4
9. Лихачев, А. Н. Особенности создания «интеллектуальных» конструкций формо- и размеростабильных систем космических аппаратов на основе диэлектрических полимерных материалов [Текст] / А. Н. Лихачев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. — 2013. — № 1 (47). — С. 114–118.
10. Bird, R. B. Dynamics of Polymeric Liquids [Text] / R. B. Bird, C. F. Curtiss, R. C. Armstrong, O. Hassager. — New York: Wiley-Interscience, 1987. — 672 p.
11. Barnes, H. A. An Introduction to Rheology [Text] / H. A. Barnes, J. F. Hutton, K. Walters. — Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989. — 199 p.
12. Двойнос, Я. Г. Уточнена методика оброблення експериментальних даних капілярної віскозиметрії [Текст] / Я. Г. Двойнос, О. Л. Сокольський, І. І. Івицький // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2015. — № 1 (14). — С. 51–54.
13. Сокольський, О. Л. Числове моделювання впливу пристінного шару на процес течії полімеру в переробному обладнанні [Текст] / О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, І. О. Мікульонюк, І. І. Івицький // Хімічна промисловість України. — 2013. — № 6. — С. 34–37.
14. Сокольський, О. Л. Визначення в'язкості пристінного шару у формуючих каналах обладнання для переробки полімерів [Текст] / О. Л. Сокольський, І. І. Івицький, В. І. Сівецький, І. О. Мікульонюк // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2014. — № 2. — С. 66–69.
15. Sokolskyi, A. L. Method of Accounting Wall Slip Polymer in Modeling Channel Processing Equipment [Text] / A. L. Sokolskyi, I. I. Ivitskiy // Modern Scientific Research and Their Practical Application. — 2014. — № 10. — P. 136–140.
16. Ивицкий, И. И. Моделирование пристенного скольжения полимера [Текст] / И. И. Ивицкий // Технологический аудит и резервы производства. — 2014. — № 5/3 (19). — С. 8–11. doi:10.15587/2312-8372.2014.27927
17. ANSYS Polyflow User's Guide [Text]. — Canonsburg: ANSYS, Inc., 2013. — 790 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВВЕДЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ В РАСПЛАВ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Проведено моделювання процесу введення інтелектуальних датчиків, призначених для моніторингу відповідних деталей і узлов, в тому числі їх напружено-деформованого стану, в расплаві полімерного композиційного матеріалу в час екструзії. Встановлені оптимальні параметри математичної моделі, оптимальні конструктивні параметри і величини впливу технологічних параметрів процесу на глибину поглинання датчиків в расплаві.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, экструзия, интеллектуальные датчики, интеллектуальные полимерные материалы.

Івицький Ігор Ігорович, кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна, e-mail: i.ivitskiy@kpi.ua.

Сокольський Олександр Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна. Куриленко Валерій Миколайович, асистент, кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна.

Ивицкий Игорь Игоревич, кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Украина.

Сокольский Александр Леонидович, кандидат технических наук, доцент, кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Украина.

Куриленко Валерий Николаевич, ассистент, кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Украина.

Ivitskiy Igor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: i.ivitskiy@kpi.ua.

Sokolskiy Alexandr, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.

Kurylenko Valerii, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine

UDK 678.686+678.04

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.81253

Полоз А. Ю.,
Липицкий С. Г.,
Куценко С. Н.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Предложено при сравнительной оценке износостойкости эпоксидных композиционных материалов использовать в качестве характеристических параметров удельную поверхностную энергию и связанный с ней динамический модуль упругости материалов. С помощью предложенных параметров проведено сравнение износа разработанных высоконаполненных карбидом кремния эпоксидных композиционных материалов, отвержденных промышленными полиаминами различной природы, в лабораторных и промышленных условиях.

Ключевые слова: эпоксидные материалы, полиамины, карбид кремния, износ, поверхностная энергия, модуль упругости.

1. Введение

Поверхность многих деталей различного оборудования (компрессоры, насосы, гидроклоны, вентиляцион-

ные установки и др.) подвергается последовательному абразивно-эрозионному (абразивно-кавитационному) разрушению под действием твердых частиц, находящихся во взвешенном состоянии в струе газа или жидкости

и воздействующих совместно со средой-носителем [1]. При этом в зависимости от соотношения размеров деталей и сечения потока среды происходит или равномерное удаление мельчайших частичек с поверхности материала, или явно выраженное локальное разрушение.

Абразивно-эрозионное (абразивно-кавитационное) разрушение зависит от большого числа факторов, связанных как с параметрами среды, так и с природой материала, подвергающегося разрушению. Кроме традиционных износостойких сталей и чугунов для деталей машин, работающих в таких условиях эксплуатации, используются разнообразные полимерные материалы, в частности, на основе эпоксидных смол [2–4]. Наиболее важным отличием эпоксидных композиционных материалов является возможность выполнения из них конструктивных элементов с повышенным ресурсом эксплуатации и заранее заданными свойствами — прочностью, износостойкостью, химической стойкостью и др. Кроме того, эпоксидные композиции в исходном состоянии обладают определенной текучестью и тиксотропностью, хорошей адгезией ко многим материалам [5], что позволяет использовать их для изготовления, ремонта и восстановления изношенных деталей.

Следовательно, увеличение сроков эксплуатации деталей, обусловленное повышением их износостойкости, способствует уменьшению простоев оборудования при замене изношенных деталей и является действенным фактором резервов производства.

Для повышения гибкости производств при переходе на новые составы эпоксидных композиционных материалов, предназначенных для работы в условиях износа, или при использовании новых компонентов в применяемых составах, необходимо установить оценочные параметры, определяющие износ таких материалов при минимальных экспериментальных затратах.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объект исследования — ненаполненные и наполненные карбидом кремния износостойкие эпоксидные композиционные материалы.

Исследуемые композиционные материалы изготавливаются на простом оборудовании — реакторах-смесителях с лопастными мешалками.

Отвержденные, например, Polyamine B эпоксидные композиционные материалы характеризуются высоким комплексом эксплуатационных свойств: ненаполненные — прочность при сжатии 160 МПа, прочность при растяжении 28 МПа, прочность при изгибе 91 МПа, ударная вязкость по Шарпи 14,8 кДж/м², максимальный износ при газоабразивном воздействии потока частиц песка 0,5–0,9 мм при скорости 76 м/с составляет $17,2 \cdot 10^{-3}$ см³ [6]; наполненные карбидом кремния F1000 (300 мас. ч. на 100 мас. ч. смолы) соответственно 166 МПа, 23,9 МПа, 76 МПа, 8,5 кДж/м², $54,6 \cdot 10^{-3}$ см³ [7].

Вводимые полиаминные отвердители для обеспечения протекания основного процесса отверждения по энергосберегающей технологии при температуре окружающей среды (15–35 °С) влияют на развиваемую температуру при реакции взаимодействия эпоксидных групп смолы с аминными группами отвердителя (может возрастать до 200 °С), что отражается на времени «жизнеспособ-

ности» композиций, т. е. возможности их технологического использования (15 мин. — 1 ч). Максимальная температура экзотермической реакции отверждения определяется также массой изготавливаемой наполненной композиции и возрастает с ее увеличением. Поэтому при технологическом использовании эпоксидных композиций с полиаминными отвердителями следует учитывать эти факторы, влияющие на производительность процесса их использования. Действенным фактором влияния на технологические характеристики эпоксидных композиций и эксплуатационные свойства отвержденных композиционных материалов является правильный выбор полиаминного отвердителя и соответствующего наполнителя.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования — выбор параметров, отражающих износ как поверхностное явление, связанное с затратой энергии на образование новой свободной поверхности, пригодных для сравнительной оценки эпоксидных композиционных материалов. Задачи исследования, вытекающие из поставленной цели:

1. Показать возможность использования удельной поверхностной энергии материала γ и связанного с нею динамического модуля упругости M_d .

2. Осуществить сравнительную оценку износостойкости высоконаполненных карбидом кремния эпоксидных композиционных материалов, полученных с применением полиаминных отвердителей различных производителей, с привлечением выбранных оценочных параметров.

3. Провести апробацию разработанного эпоксидного композиционного материала с привлечением предложенных оценочных параметров в производственных условиях и сравнить по результатам испытаний разработанный материал с применяемым.

4. Анализ литературных данных

Выбор полиаминного отвердителя и наполнителя для обеспечения конкретных условий эксплуатации эпоксидных композиционных материалов требует существенных экспериментальных затрат, которые могут быть значительно сокращены при выборе соответствующих параметров сравнительной оценки необходимых свойств материалов.

С целью прогнозирования поведения конструкционных материалов (металлов) в отмеченных выше условиях эксплуатации в качестве оценочного параметра предложено использовать модуль упругости материала, который справедлив и в условиях эрозионного износа поверхности полимеров потоком ударяющих твердых частиц [8]. Однако даже в случае металлов наблюдается ряд исключений из данной закономерности [8].

С учетом того, что при износе имеет место отделение частиц от поверхности материала с образованием новой свободной поверхности, в качестве характеристического параметра предложено использовать величину затрачиваемой энергии на образование площади поверхности, т. е. удельную поверхностную энергию материала γ с привлечением модифицированной формулы Орована [8]:

$$Y = \frac{1 \cdot E}{10 \cdot \alpha_0} \cdot \left(\frac{M}{\rho} \right)^{2/3}, \quad (1)$$

где E — модуль упругости материала; α_0 — мера дальности межмолекулярного взаимодействия (приближенно пропорционально мономерному звену полимера); M — молекулярная масса полимера; ρ — плотность полимера.

При этом для приближенного сравнения износостойкости двух полимерных материалов применены отношения их удельных поверхностных энергий с использованием в качестве α_0 полимеров величин молекулярных масс их мономерных звеньев (например, полистирола α_{01} и полиэтилена α_{02} при одинаковых значениях M_1 и M_2) [8]:

$$\frac{Y_1}{Y_2} = \frac{E_1 \cdot \alpha_{01}}{E_2 \cdot \alpha_{02}} \cdot \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{2/3} \quad (2)$$

Однако в этом случае не принимается во внимание взаимодействие атомов и групп в молекулах полимеров, которое можно учесть с использованием экспериментальных [9, 10] или расчетных методов [11–15] определения поверхностной энергии. В то же время износостойкость эпоксидных композиционных материалов, полученных на основе одной и той же эпоксидной смолы (γ_1 и γ_n имеют одинаковые значения) при их сравнении согласно формуле (2) главным образом определяются соотношением модулей упругости материалов.

С учетом динамического воздействия потока частиц материалов в различных установках на поверхность соответствующих деталей целесообразно использовать для сравнительной оценки эпоксидных композиционных материалов значения их динамических модулей упругости M_d .

Таким образом, с целью сравнительной оценки износостойкости в условиях контактно-динамического воздействия потока ударяющих частиц на поверхность деталей различного оборудования из эпоксидных композитов (или имеющих защитный слой из таких композитов) в данном сообщении предложено использовать в качестве оценочного параметра динамический модуль упругости композиционных материалов, который характеризует степень превращения функциональных групп и плотность поперечных связей в сетчатом полимере, определяющих комплекс эксплуатационных свойств композитов [6, 16, 17]; удельную поверхностную энергию эпоксидных смол γ , определяемую экспериментально или расчетными методами, — для оценки среднего размера элементарных частиц разрушения при износе d_{lim} материалов с использованием формулы, предложенной в [18]:

$$d_{lim} = 24000 \frac{Y}{\sigma}, \quad (3)$$

где σ — предел прочности материала.

5. Материалы и методы исследований

В исследованиях в качестве эпоксидной матрицы использовали наиболее широко применяемую в промышленности диановую смолу ЭД-20 согласно ГОСТ 105877-84 производства завода им. Свердлова, Россия (среднечисленная молекулярная масса $M_n = 390$ г/моль, содержание эпоксидных групп 21,8 % мас.) с добавлением 10 мас. ч. активного разбавителя — диглицидилового эфира диэтиленгликоля согласно ТУ 2225-390-04872688-98 производства ОАО «НИИ ХИМПОЛИМЕР», Россия (содержание эпоксидных групп 25,7 % мас., динамическая вязкость при 25 °С 0,07 Па·с). Полиаминные отвердители — низковяз-

кие светлые жидкости соответствовали стандартам фирм-производителей, вводились в рекомендуемых производителями количествах и имели следующие характеристики: полиэтиленполиамин — ПЭПА (ОАО «Уралхимпласт», Россия) — смесь линейных и разветвленных этиленовых и пиперазинсодержащих этиленовых полиаминов от диэтилентриамина и *N*-аминоэтилпиперазина до соединений с 6–7 атомами азота, динамическая вязкость при 25 °С (η) 90 мПа·с, аминное число (А) 205 мг КОН/г; Polyamine В («AkzoNobel», Швеция) — смесь тетраэтиленпентамина, пентаэтиленгексамина, гексаэтиленгептамина и более высокомолекулярных аминов, содержание тетраэтиленпентамина (ТЕРА) 15 % мас., более высококипящих аминов, чем пентамин, 83 % мас., менее кипящих аминов — 1 % мас.; CeTePox 1410 Н («Chemicals and technologies for polymers GmbH», Германия/Италия) — модифицированный циклоалифатический полиамин, $\eta = 550$ мПа·с, водородный эквивалент (Н) 95 г/экв; Epikure F-205 («Resolution Performance Products», Англия) — модифицированный циклоалифатический полиамин, $\eta = 500$ мПа·с, $H = 105$ г/экв.

В матрицу для повышения износостойкости [19] вводили дисперсный наполнитель с высокой твердостью по шкале Мооса [20] — карбид кремния SiC F-1000 (с размерами частиц 5–7 мкм) согласно ТУ У 24.1-00222226-059:2006, а также полидисперсного состава (с размерами частиц от 5 до 2200 мкм) при изготовлении промышленных образцов песковых насадок и сливных патрубков гидроциклонов.

Композиции готовили путем введения эпоксидной диановой смолы ЭД-20, активного разбавителя, наполнителей в реактор периодического действия при температуре 60 °С, компоненты перемешивали в течение 15 мин. Полиаминные отвердители добавляли в композиции перед их применением при температуре 20–25 °С, перемешивали на протяжении 5–7 мин. Готовые композиции заливали в соответствующие формы и отверждали по энергосберегающей технологии при 20 ± 2 °С в течение 24 ч. Для улучшения свойств композитов образцы подвергали термообработке по оптимизированному режиму (80 + 100 °С) × 4,5 ч.

Основные физико-механические свойства определяли в статических условиях на плоских образцах шириной 15 мм, толщиной 10 мм и длиной 125 мм согласно принятым стандартам, динамический модуль упругости E_d при 22 ± 2 °С с использованием прибора ИПМ-1К [21], разработанного в Академии Наук Республики Беларусь с применением соответствующих математических зависимостей. В приборе использован метод динамического индентирования, заключающийся в нанесении удара посредством жесткого индентора по испытываемому композиту в однократном импульсном режиме [21]. При импульсном нагружении композит проявляет вязкоупругие свойства, которые невозможно оценить при статическом воздействии; кроме того, динамическое нагружение моделирует наиболее жесткие условия, которым может подвергаться композиционный материал в процессе эксплуатации. Вязкоупругие свойства характеризовали с использованием моделей Максвелла и Кельвина-Фойхта. Модель Максвелла в первом приближении описывает релаксацию упругого тела, а модель Кельвина-Фойхта — его ползучесть [21].

Износостойкость композитов оценивали в условиях жесткого газообразного износа образцов размерами 20 × 15 × 4 мм потоком частиц песка 0,5–0,9 мм при ско-

рости 76 м/с на центробежном ускорителе твердых частиц ЦУК-3 согласно ГОСТ 23.201-78 под разными углами атаки абразива: 15°, 30°, 45°, 60° и 90°.

Поверхностное натяжение (удельную поверхностную энергию) эпоксидной смолы ЭД-20 определяли с помощью статического метода Вильгельми путем взвешивания частично погруженной в смолу платиновой пластинки согласно описанной методике [9].

6. Результаты исследований

В табл. 1 представлены результаты испытаний ненаполненных и наполненных карбидом кремния эпоксидных композиционных материалов на основе смолы ЭД-20, отвержденных полиаминами различных производителей и представляющих интерес при разработке новых эффективных износостойких композиций. Из приведенных результатов следует, что значения отношений максимального износа рассмотренных материалов соответствуют значениям отношений их динамических модулей упругости. Следовательно, по данным значений динамических модулей упругости композиционных материалов (или по их максимальным значениям износа) можно прогнозировать при сравнении их износостойкость (или значения динамических модулей упругости), что сокращает значительно экспериментальные затраты и время достижения желаемого результата.

Таблица 1

Влияние динамических модулей упругости эпоксидных композиционных материалов на основе смолы ЭД-20, отвержденных промышленными полиаминами, на их износостойкость при контактно-динамическом газоабразивном износе

Полиаминный отвердитель (мас. ч. на 100 мас. ч. ЭД-20)	Динамический модуль упругости $E_d \cdot 10^{-10}$, Н/м ²	Максимальный износ $\Delta V \cdot 10^3$, см ^{3*}	Отношение динамических модулей упругости E_{d1}/E_{d2}	Отношение максимального износа $\Delta V_1/\Delta V_2$
Ненаполненные композиционные материалы				
Epikure F-205** (58,0)	1,43	15,9	—	—
CeTePox 1410H (54,0)	1,36	16,7	1,051	1,050
Polyamine B (10,0)	1,33	17,2	1,075	1,082
ПЭПА (10,0)	1,32	17,8	1,083	1,110
Наполненные (300 мас. ч. на 100 мас. ч. ЭД-20) карбидом кремния F-1000 композиционные материалы				
Epikure F-205** (58,0)	2,22	50,7	—	—
CeTePox 1410H (54,0)	2,12	53,1	1,047	1,047
Polyamine B (10,0)	2,07	54,6	1,072	1,077
ПЭПА (10,0)	2,05	55,5	1,083	1,095

Примечание: * — максимальный износ ΔV для ненаполненных композиционных материалов наблюдался при угле атаки абразива 45°, для наполненных материалов — при 90°; ** — при сравнении в качестве базовых взяты значения E_{d1} и ΔV_1 для композиционных материалов, отвержденных Epikure F-205

Сравнение среднего размера элементарных частиц разрушения при износе композиционных материалов (табл. 2) в зависимости от применяемого полиаминного отвердителя позволяет оценить их износостойкость (по размеру частиц

при износе) с учетом удельной поверхностной энергии (поверхностного натяжения) и такой важный эксплуатационный параметр материалов — предел прочности при растяжении, выбрать наиболее оптимальный отвердитель.

Таблица 2

Максимальный износ ΔV и средний размер элементарных частиц разрушения d_{lim} ненаполненных эпоксидных композиционных материалов на основе смолы ЭД-20

Полиаминный отвердитель	Предел прочности при растяжении σ , МПа	d_{lim} , мм*	$\Delta V \cdot 10^3$, см ³
ПЭПА	22,3	0,053	17,8
Polyamine B	28,1	0,042	17,2
CeTePox 1410H	30,0	0,039	16,7
Epikure F-205	30,8	0,038	15,9

Примечание: * — при расчетах d_{lim} принято определенное экспериментальное значение удельной поверхностной энергии эпоксидной смолы ЭД-20 $\gamma = 49,3$ мДж/м² (49,3 мН/м)

Для проверки предложенного подхода к сравнительной оценке износостойкости эпоксидных композиционных материалов с использованием в качестве оценочного параметра их динамического модуля упругости были проведены испытания песковых насадок с диаметром разгрузочного отверстия 90 мм и сливных патрубков диаметром 150 мм гидроциклонов в условиях Полтавского горно-обогатительного комбината (Украина). Выбор песковых насадок для испытаний был обусловлен их наибольшей подверженности абразивному износу. Предварительно проведенный анализ сроков эксплуатации песковых насадок из различных материалов (полиуретан, жидкое стекло с карбидом кремния, износостойкий бетон, эпоксидная смола с электрокорундом, эпоксидная смола со стеклонеполнителем, эпоксидная смола с карбидом кремния) в условиях горно-обогатительных комбинатов Днепропетровской области показал существенные преимущества разработанного ООО «Новые технологии» (Украина) эпоксикерамического композиционного материала, высоконаполненного карбидом кремния [4]. Поэтому сравнение осуществляли для песковых насадок с наибольшей (отвердитель Epikure F-205) и наименьшей (отвердитель ПЭПА) износостойкостью разработанных высоконаполненных карбидом кремния эпоксидных композиционных материалов, а также песковых насадок из литого чугуна, используемых на этом предприятии.

Испытания были проведены на батарее гидроциклонов № 12 секции № 1 обогатительной фабрики № 1 и на батарее № 1408 секции № 14 обогатительной фабрики № 2 при следующей комплектации батарей: 4 гидроциклона ГЦМ-650 на фабрике № 1 и 4 гидроциклона ГЦМ-710 на фабрике № 2, разделенные на 2 полубатареи (по 2 гидроциклона на коллектор). Питание на обе полубатареи на каждой фабрике подавалось от одного насоса XR-350 («Metso Minerals») производительностью 1300–1400 м³/ч. Замена песковых насадок проводилась при увеличении их диаметра разгрузочного отверстия от исходного более, чем на 20 мм (110 мм, 100 % износ). Результаты производственных испытаний, представленные в табл. 3 и на рис. 1, 2, показали, что средний срок эксплуатации песковых насадок с использованием высоконаполненного карбидом кремния эпоксидного композиционного материала в 3–5 раз превосходит срок эксплуатации аналогичных песковых насадок из литого чугуна. Песковые насадки из разработанного эпоксидного

композиционного материала имели равномерный износ без промоин в отличие от песковых насадок из литого чугуна, которые имели неравномерный износ со спиралевидными промоинами по внутренней стенке насадок от фланца к разгрузочному отверстию.

Примечательно, что опытные песковые насадки, установленные на обогатительной фабрике № 1, с близкими значениями динамического модуля упругости, износостойкости (отвердители ПЭПА и Polyamine B) эпоксидных композиционных материалов имели близкую динамику износа и срок эксплуатации (рис. 1).

Таблица 3

Сроки эксплуатации песковых насадок гидроциклонов в условиях ОАО «Полтавский горно-обогатительный комбинат» (Украина)

Показатели	Обогатительная фабрика № 1		Обогатительная фабрика № 2	
	ГЦМ-650		ГЦМ-710	
Марка гидроциклона	ГЦМ-650		ГЦМ-710	
Материал песковых насадок: литой чугун (лч) высоконаполненные карбидом кремния композиты (ЭКМ), отвержденные полиаминами	лч	ЭКМ ₁ + ПЭПА ЭКМ ₂ + Polyamine B	лч	ЭКМ ₁ + ПЭПА ЭКМ ₃ + Epikure F-205
Динамический модуль упругости композитов (Па), отвержденных: ПЭПА Polyamine B Epikure F-205	—	2,84·10 ¹⁰ 2,89·10 ¹⁰ —	—	2,84·10 ¹⁰ — 2,92·10 ¹⁰
Срок эксплуатации песковых насадок, ч	1410, 1030, 1050, 1300, 795	ЭКМ ₁ + ПЭПА 5585 ЭКМ ₂ + Polyamine B 5700	718, 2505, 1787, 1395	ЭКМ ₁ + ПЭПА 4430 ЭКМ ₃ + Epikure F-205 4540
Отношения динамических модулей упругости композитов	—	ЭКМ ₂ /ЭКМ ₁ 1,018	—	ЭКМ ₃ /ЭКМ ₁ 1,028
Отношения сроков эксплуатации песковых насадок на основе композитов	—	ЭКМ ₂ /ЭКМ ₁ 1,020	—	ЭКМ ₃ /ЭКМ ₁ 1,025

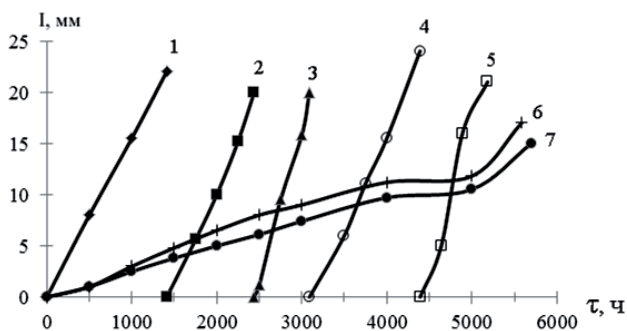


Рис. 1. Динамика износа (l) и замены песковых насадок (τ) гидроциклонов ГЦМ-650: 1–5 — песковые насадки из литого чугуна; 6–7 — песковые насадки из композитов с карбидом кремния, отвержденных: 6 — ПЭПА; 7 — Polyamine B

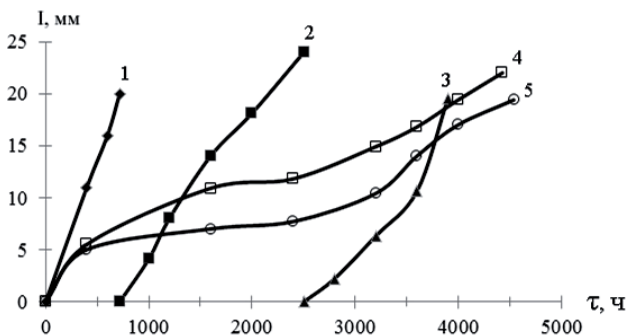


Рис. 2. Динамика износа (l) и замены песковых насадок (τ) гидроциклонов ГЦМ-710: 1–3 — песковые насадки из литого чугуна; 4–5 — песковые насадки из композитов с карбидом кремния, отвержденных: 4 — ПЭПА; 5 — Epikure F-205

Опытные песковые насадки гидроциклонов на обогатительной фабрике № 2, отличающиеся значениями этих показателей эпоксидных композиционных материалов (отвердители Epikure F-205 и ПЭПА), имели различную динамику износа (рис. 2) в соответствии с их значениями динамического модуля упругости (табл. 3) особенно в средний период эксплуатации (рис. 2).

Высокая износостойкость эпоксикерамических песковых насадок производства ООО «Новые технологии» (Украина) позволяет снизить затраты на расходные материалы, трудозатраты при замене деталей, а совершенствование конструкции гидроциклонов с применением спирального ввода пульпы обеспечивает ее плавную передачу, уменьшает гидродинамические удары, что повышает эффективность классификации. Для получения более высокой эффективности классификации при больших объемах подачи пульпы разработан типоразмерный ряд компактных и удобных в эксплуатации батарей гидроциклонов с кольцевым или линейным, одноярусным или многоярусным вертикальным или наклонным расположением гидроциклонов.

Сливные патрубки из разработанного эпоксикерамического композиционного материала после эксплуатации в течении 5600 ч не имели нарушений их геометрических параметров; сливные же патрубки из литого чугуна имели промоины внизу проточной части глубиной 5–7 мм. Характер износа сливных патрубков из литого чугуна свидетельствует о возможности их отрыва от фланца при дальнейшей эксплуатации, что повлечет собой в работе гидроциклонов.

Таким образом, проведенные производственные испытания песковых насадок и сливных патрубков гидроциклонов из высоконаполненного карбидом кремния эпоксидного композиционного материала подтвердили возможность сравнительной оценки их износостойкости, а, следовательно, и эксплуатационной долговечности, по предложенному оценочному параметру — значению динамического модуля упругости материала и показали высокую эффективность разработанного композиционного материала.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Использование предложенных оценочных параметров позволяет повысить гибкость производственного процесса при изготовлении новых износостойких эпоксидных композиционных материалов. Использование новых компонентов в применяемых составах также позволяет сократить затраты на достижение требуемых свойств материалов и изделий.

Weaknesses. Протекание экзотермической реакции отверждения эпоксидных композиций полиаминами, приводящей к возможному повышению температуры композиции до 200 °С, ограничивает время технологической переработки и массу одновременно изготавливаемой композиции.

Opportunities. Перспективы дальнейших исследований при разработке новых и совершенствовании применяемых эпоксидных композиций конструкционного назначения связаны с выбором соответствующего параметра, связывающего структуру применяемых полиаминных отвердителей с их активностью при отверждении композиций. Таким параметром может быть электронная структура полиаминов, рассчитываемая квантово-химическими методами.

Threats. К угрозам исследования относятся изменяющиеся принципы отечественного производства эпоксидных композиционных материалов конструкционного назначения.

8. Выводы

1. Предложено использовать удельную поверхностную энергию и связанный с нею динамический модуль упругости композиционных материалов на основе эпоксидных смол в качестве оценочных параметров при сравнении их износостойкости.

2. Выполнена сравнительная оценка износа высоконаполненных карбидом кремния эпоксидных композиционных материалов, отвержденных промышленными полиаминами различной природы. Оценка показала целесообразность привлечения предложенного оценочного параметра — динамического модуля упругости материалов для выбора наиболее эффективного отверждающего агента композиций — EpiKure F-205, обеспечивающего динамический модуль упругости наполненных карбидом кремния композиционных материалов на уровне $2,92 \cdot 10^{10}$ Н/м².

3. Проведены производственные испытания песковых насадок и сливных патрубков гидроциклонов из разработанных высоконаполненных карбидом кремния эпоксидных композиционных материалов. В результате чего было получено подтверждение их высокой эксплуатационной долговечности, для сравнительной оценки которой использовались значения динамических модулей упругости примененных материалов, превышающей в 3–5 раз долговечность таких же изделий из широко применяемого литого чугуна.

Литература

1. Ягер, М. Абразивный износ — неразрешимая проблема? [Текст] / М. Ягер, К. Готье // Композитный мир. — 2010. — № 2. — С. 6–15.
2. Mark, H. F. Encyclopedia of Polymer Science and Technology [Text] / ed. by H. F. Mark. — John Wiley & Sons, 2002. — 3005 p. doi:10.1002/0471440264
3. Pascault, J. R. Epoxy Polymers: New Materials and Innovations [Text] / ed. by J. R. Pascault, J. J. Williams. — John Wiley & Sons, 2010. — 367 p. doi:10.1002/9783527628704
4. Полоз, О. Ю. Зносостійкі епоксидні композити конструкційного призначення [Текст] / О. Ю. Полоз, С. Г. Липицький, С. М. Кущенко // Хімічна промисловість України. — 2015. — № 5 (130). — С. 25–27.
5. Petrie, E. M. Epoxy Adhesive Formulations [Text] / E. M. Petrie. — McGRAW-HILL, 2006. — 536 p.
6. Полоз, А. Ю. Сравнительная оценка полиаминных отвердителей эпоксидных композиций [Текст] / А. Ю. Полоз, Ю. Р. Эбич, Р. М. Долинская, В. В. Мозгалев, Н. Р. Прокочук // Полимерные материалы и технологии. — 2016. — Т. 2, № 1. — С. 30–35.
7. Полоз, А. Ю. Особенности экзотермической реакции отверждения износостойких эпоксидных композиций полиаминами [Текст] / А. Ю. Полоз, С. Г. Липицький, С. Н. Кущенко, Ю. Р. Эбич, Е. А. Иванова // Вопросы химии и химической технологии. — 2013. — № 6. — С. 61–65.
8. Дырда, В. И. Резиновые детали в инженерной практике [Текст] / В. И. Дырда, Е. Ф. Чижик, В. И. Княшко, Н. Г. Карачабан. — Днепропетровск: Поліграфіст, 1998. — 303 с.

9. Файнерман, А. Е. Простой метод определения поверхностного натяжения и краевых углов смачивания жидкостей [Текст] / А. Е. Файнерман, Ю. С. Липатов, В. М. Кулик, Л. Н. Волошина // Коллоидный журнал. — 1970. — Т. 32, № 4. — С. 620–623.
10. Файнерман, А. Е. Новое в определении поверхностного натяжения твердых полимеров [Текст] / А. Е. Файнерман. — К.: Наукова думка, 1975. — С. 17–29.
11. Аскадский, А. А. Количественный анализ влияния химического строения на физические свойства полимеров [Текст] / А. А. Аскадский // Высокомолекулярные соединения. — 1995. — Т. 37Б, № 2. — С. 332–357.
12. Аскадский, А. А. Компьютерное материаловедение полимеров [Текст]. Т. 1. Атомно-молекулярный уровень / А. А. Аскадский, В. И. Кондраченко. — М.: Научный мир, 1999. — 544 с.
13. Аскадский, А. А. Химическое строение и физические свойства полимеров [Текст] / А. А. Аскадский, Ю. И. Матвеев. — М.: Химия, 1983. — 248 с.
14. Аскадский, А. А. Расчетная схема для определения поверхностного натяжения органических жидкостей и полимеров исходя из их химического строения [Текст] / А. А. Аскадский, М. С. Матевосян, Г. Л. Слонимский // Высокомолекулярные соединения. — 1987. — Т. 29А, № 4. — С. 753–760.
15. Аскадский, А. А. Универсальная расчетная схема для оценки поверхностного натяжения органических жидкостей и полимеров [Текст] / А. А. Аскадский, Т. Р. Размадзе // Высокомолекулярные соединения. — 1991. — Т. 33А, № 5. — С. 1141–1148.
16. Волков, А. С. Изучение процесса отверждения связующего на основе бифункционального эпоксидного олигомера в смеси с тетра — и полиглицидиловыми модификаторами различными методами [Текст] / А. С. Волков, И. А. Крючков, С. И. Казаков, И. Ю. Горбунова, М. Л. Кербер // Пластические массы. — 2008. — № 10. — С. 7–10.
17. Полоз, А. Ю. Вязкоупругие свойства износостойких эпоксидных композитов [Текст] / А. Ю. Полоз, Ю. Р. Эбич, Р. М. Долинская, В. В. Мозгалев // Вопросы химии и химической технологии. — 2013. — № 5. — С. 72–77.
18. Rabinovicz, E. Friction and Wear of Materials [Text] / E. Rabinovicz. — New York: Wiley, 1965. — 244 p.
19. Durand, J. M. Role of reinforcing ceramic particles in the wear behaviour of polymer-based model composites [Text] / L. M. Durand, M. Vardavoulas, M. Jeandin // Wear. — 1995. — Vol. 181–183. — P. 833–839. doi:10.1016/0043-1648(95)90203-1
20. Добровольский, А. Г. Абразивная износостойкость материалов [Текст]: справочное пособие / А. Г. Добровольский, П. И. Кошеленко. — К.: Техніка, 1989. — 128 с.
21. Крень, А. П. Определение вязкоупругих параметров методом динамического индентирования с использованием нелинейной модели деформирования [Текст] / А. П. Крень, В. А. Рудницкий, И. Г. Дейкун // Каучук и резина. — 2004. — № 6. — С. 19–23.

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ПОРІВНЯЛЬНОЇ ОЦІНКИ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Запропоновано при порівняльній оцінці зносостійкості епоксидних композиційних матеріалів використовувати в якості характеристик параметрів питомо поверхневу енергію і пов'язаний з нею динамічний модуль пружності матеріалів. З залученням запропонованих параметрів проведено порівняння зношування розроблених високонаповнених карбідом кремнію епоксидних композиційних матеріалів, отверднених промисловими поліамінами різної природи, в лабораторних та промислових умовах.

Ключові слова: епоксидні матеріали, поліаміни, карбід кремнію, зношування, поверхнева енергія, модуль пружності.

Полоз Алексей Юрьевич, кандидат технических наук, начальник отдела научно-технического развития, ООО «Новые технологии», Днепр, Украина, e-mail: vektor@imail.ru.

Липицький Станіслав Григорьевич, кандидат технических наук, коммерческий директор, ООО «Новые технологии», Днепр, Украина.
Кущенко Сергей Николаевич, кандидат технических наук, технический директор, ООО «Новые технологии», Днепр, Украина.

Полоз Олексій Юрійович, кандидат технічних наук, начальник відділу науково-технічного розвитку, ТОВ «Нові технології», Дніпро, Україна.

Липицький Станіслав Григорьевич, кандидат технічних наук, комерційний директор, ТОВ «Нові технології», Дніпро, Україна.
Кущенко Сергій Миколайович, кандидат технічних наук, технічний директор, ТОВ «Нові технології», Україна.

Poloz Alexey, LTD «New Technologies», Dnipro, Ukraine, e-mail: vektor@imail.ru.

Lipitsky Stanislav, LTD «New Technologies», Dnipro, Ukraine.
Kushchenko Sergey, LTD «New Technologies», Dnipro, Ukraine