

25. Эйхкофф, П. Основы идентификации систем управления: оценивание параметров и состояния [Текст] / П. Эйхкофф. — М.: Мир, 1975. — 683 с.

РАЗРАБОТКА УПРОЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Разработана и исследована упрощенная математическая модель процесса формирования углеродных изделий, которая отличается от известных моделей практически нулевым временем ее расчета. Построенная упрощенная математическая модель позволяет повысить эффективность исследования температурного режима процесса формирования углеродных изделий за счет сокращения времени исследования, определять температуры в любой точке процесса.

Ключевые слова: углеродные изделия, формирования, математическая модель, температурный режим.

Жученко Олексій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизації хімічних виробництв, Національний

технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна, e-mail: azhuch@ukr.net. Хібеба Микола Григорович, аспірант, кафедра автоматизації хімічних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна.

Жученко Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра автоматизации химических производств, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Украина. Хибоба Николай Григорьевич, аспирант, кафедра автоматизации химических производств, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Украина.

Zhuchenko Oleksii, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: azhuch@ukr.net.

Khibeba Mykola, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine

УДК 678.027.3:621.3.084.2

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.81236

Івіцький І. І.,
Сокольський О. Л.,
Куриленко В. М.

МОДЕЛЮВАННЯ ВВЕДЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ДАТЧИКІВ У РОЗПЛАВ ПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

Проведено моделювання процесу введення інтелектуальних датчиків, що застосовуються для моніторингу відповідальних деталей та вузлів, зокрема їх напружено-деформованого стану, у розплав полімерного композиційного матеріалу під час екструзії. Встановлено оптимальні параметри математичної моделі, оптимальні конструктивні параметри та величини впливу технологічних параметрів процесу на глибину занурення датчиків у розплав.

Ключові слова: полімерний композиційний матеріал, екструзія, інтелектуальні датчики, інтелектуальні полімерні матеріали.

1. Вступ

Прогрес в різних областях техніки, і перш за все в авіакосмічній техніці, робототехніці, електроніці, медицині, пов'язаний з широким використанням наукоємних технологій і нових матеріалів. Одним з найважливіших напрямків розвитку цих сфер є розробка на основі досягнень наукомістких технологій матеріалів, здатних здійснювати моніторинг відповідальних деталей та вузлів, зокрема їх напружено-деформованого стану, за допомогою введення у матеріал інтелектуальних датчиків, сигнали з яких у вигляді зміни електричного або магнітного поля змінюються під дією деформацій та напружень і зчитуються спеціальним обладнанням. При створенні таких матеріалів у їх структуру можливе введення не лише датчиків, а й актуаторів, які можуть вносити в структуру матеріалу зміни на основі сигналів, отриманих від датчиків [1].

При введенні інтелектуальних датчиків важливо досягти високої точності введення на певну глибину готового виробу. Експериментальний ітераційний підбір

необхідних технологічних режимів для точного введення призводить до значного збільшення часу налаштування обладнання. Визначення технологічних параметрів при моделюванні дозволить значно зменшити час налаштування та введення у експлуатацію.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є процес введення інтелектуальних датчиків у розплав полімерного композиційного матеріалу під час екструзії.

За основу взятий пристрій введення інтелектуальних датчиків, описаний у праці [1]. Схема каналу, що використовувалася для моделювання процесу введення датчиків у розплав полімерного матеріалу, представлена на рис. 1.

Пристрій, схема якого зображена на рис. 1 працює наступним чином: необхідну кількість інтелектуальних датчиків вводять у невелику дозу полімерного матеріалу, після чого суміш подається у основний потік

розплаву крізь капіляр, розташований під кутом до основного каналу, під тиском, що вище за перепад тиску у основному каналі. В зв'язку з надзвичайно низькою концентрацією датчиків у суміші вони не призводять до зміни її властивостей.



Рис. 1. Схема каналу

При введенні інтелектуальних датчиків одним з найважливіших параметрів готового виробу є глибина занурення датчиків, адже при контролі напружено-деформованого стану за допомогою датчика важливо співвідносити отримані дані з місцем розташування датчика, а саме — глибиною його занурення для неперервного виробу. В зв'язку з цим, при виробництві важливо досягти високої точності введення інтелектуальних датчиків на певну глибину готового виробу.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження — встановити величини впливу технологічних параметрів процесу екструзії полімерного композиційного матеріалу з інтегрованими інтелектуальними датчиками на глибину занурення датчиків у розплав.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

1. Обрати фізичну модель та визначити оптимальні параметри математичної моделі.
2. Провести ряд числових моделювань з різними геометричними параметрами та граничними умовами.
3. Отримати емпіричні рівняння впливу досліджуваних параметрів на процес за допомогою апроксимації залежностей, отриманих при числовому моделюванні.

4. Аналіз літературних даних

Найбільш повно питання створення, виготовлення та застосування інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів розглянуто у праці [1]. Автор розглядає можливість введення у полімерний матеріал різних типів датчиків та інших модифікаторів, які дозволяють не тільки значно розширити сферу застосування полімерних композицій, а й знайти нові сфери застосування таких матеріалів. У праці [2] проводиться загальне порівняння полімерних композицій без інтелектуальних датчиків та з ними, роблячи висновки про можливість їх застосування у різних сферах. Проте, автори не загострюють увагу на технологіях введення датчиків та параметрах обладнання.

У дослідженнях [3, 4] розглядається створення інтелектуальних полімерних систем на базі електроактивних датчиків, які дозволяють контролювати дію зовнішніх

факторів на виріб, зокрема тиску, деформації, температури, тощо. Це дозволяє здійснювати моніторинг відповідальних деталей та вузлів в режимі реального часу. У роботах [5, 6] розглядається можливість використання інтелектуальних полімерних матеріалів у медицині, зокрема, для таких високовідповідальних застосувань, як протезування суглобів, штучні кардіоклапани та ін. Робота [7] присвячена застосуванню інтелектуальних полімерних матеріалів у хімічній промисловості та медицині, розглядаються особливості їх використання та застосування. За допомогою інтелектуальних датчиків можна здійснювати неруйнівний контроль і за якістю деяких процесів формування, наприклад, термоусадки з'єднувальних муфт з пам'яттю форми [8].

Автор [9] розглядає можливість застосування інтелектуальних полімерних композицій для космічних апаратів, що дозволять покращити їх експлуатаційні характеристики.

Проте, автори вищезгаданих робіт приділяють значну увагу лише особливостям застосування готових виробів зовсім не зупиняючись на технології виробництва таких виробів. Таким чином, питання технології введення інтелектуальних датчиків у розплав полімерного композиційного матеріалу є недостатньо вивченим.

5. Матеріали та методи досліджень

Моделювання процесу введення інтелектуальних датчиків у потік полімерного матеріалу здійснюється на основі положень методу скінчених елементів. Розв'язується стаціонарна задача у ізотермічному наближенні, за основу взята узагальнена модель ньютонівської потоку [10, 11], що базується на вирішенні рівнянь нерозривності нестисливої рідини і збереження імпульсу.

Рівняння нерозривності нестисливої рідини:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

де v_i , $i = \overline{1,3}$ — компоненти вектора швидкості, м/с; x_i , $i = \overline{1,3}$ — декартові координати, м.

Рівняння збереження імпульсу:

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_i v_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i, \quad (2)$$

де ρ — густина, кг/м³; t — час, с; p — тиск, Па; τ_{ij} , $i = \overline{1,3}$, $j = \overline{1,3}$ — компоненти тензора напружень, Па; g_i , $i = \overline{1,3}$ — компоненти вектора прискорення вільного падіння, м/с².

Оскільки $t = \text{const}$, то рівняння (2) матиме вигляд:

$$\frac{\partial \rho v_i v_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i. \quad (3)$$

Девіатор тензору деформації визначається:

$$\tau_{ij} = 2\eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}, \quad (4)$$

де η — динамічна в'язкість, Па·с; $\dot{\gamma}$ — швидкість зсуву, с⁻¹, яка визначається:

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right). \quad (5)$$

Залежність в'язкості від швидкості зсуву виражена степеневим законом:

$$\eta(\dot{\gamma}) = K(\lambda\dot{\gamma})^{n-1}, \quad (6)$$

де K — коефіцієнт консистенції, Па·с; λ — період релаксації, с; n — індекс течії.

Параметри матеріалу для залежності (6) визначаються експериментально з наступним обробленням експериментальних даних, як показано, наприклад, в роботі [12].

Попередні дослідження [13] впливу пристінних шарів розплаву на процес течії полімеру в переробному обладнанні показали, що нехтування ковзанням матеріалу по стінці каналу може призвести до значних спотворень результатів числового моделювання у порівнянні з реальним процесом. Моделювання пристінних ефектів може бути здійснено або за рахунок введення пристінного шару з відмінною від основного потоку в'язкістю [14], або за рахунок вказання швидкості на стінці каналу, відмінної від нуля [15, 16]. Враховуючи високу складність застосування першого метода для цієї задачі та невелику відмінність у отримуваних результатах, при розв'язанні даної задачі використовувався підхід з завданням швидкості на стінці.

Пристінні ефекти на стінці описуються за допомогою узагальненого закону Нав'є [17]:

$$\tau = -F_{slip} |v_s - v_w|^{e_{slip}}, \quad (7)$$

де v_s — тангенціальна швидкість течії; v_w — тангенціальна швидкість стінки; F_{slip} та e_{slip} — параметри матеріалу, що визначаються експериментально.

З метою визначення мінімально необхідної густоти розрахункової сітки для отримання якісного результату розрахунку проведено дослідження збіжності сітки за допомогою поступового зменшення характерного розміру елемента та співставленням контрольного параметра при різних значеннях граничних розмірів елемента. Для задач течії по каналах найбільш характерним параметром є перепад тиску, який використано в якості контрольного параметра.

Дослідження збіжності сітки проводилося співставленням перепадів тиску при різних значеннях граничних розмірів елемента. Результати дослідження зображено на рис. 2.

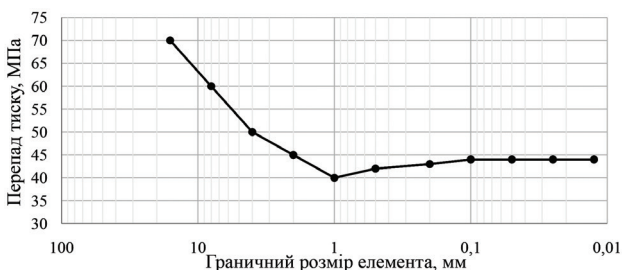


Рис. 2. Залежність перепаду тиску від граничного розміру елемента

Як видно з рис. 2, зменшення розміру елемента менше 0,1 мм впливає на перепад тиску несуттєво. Враховуючи, що при побудові скінченно-елементної моделі доцільно використовувати елементи, розмір яких достатньо малий, щоб суттєво не впливати на перепад тиску,

але не занадто малий, щоб значно не збільшувати час розрахунку, при побудові даної скінченно-елементної моделі було використано елементи розміром 0,1 мм.

При попередньому моделюванні визначається відстань від точки введення датчиків до поперечного перетину каналу, де течія має установлений характер, з метою знаходження оптимальної довжини каналу при побудові скінченно-елементної моделі.

При моделюванні течії використовувалися параметри матеріалу для поліетилену високого тиску марки 15803-020 (ГОСТ 16337-77), що були попередньо визначені експериментально.

6. Результати досліджень

При числовому моделюванні здійснювалася зміна тиску у додатковому каналі та вимірювалася глибина занурення датчику. Для прикладу, на рис. 3 зображено траєкторію руху датчика у розплаві полімерного матеріалу, введеного під кутом 45°, при відношенні тиску у додатковому каналі до тиску у основному каналі $\Delta P_B/\Delta P = 2$, а на рис. 4 при відношенні тисків $\Delta P_B/\Delta P = 50$.

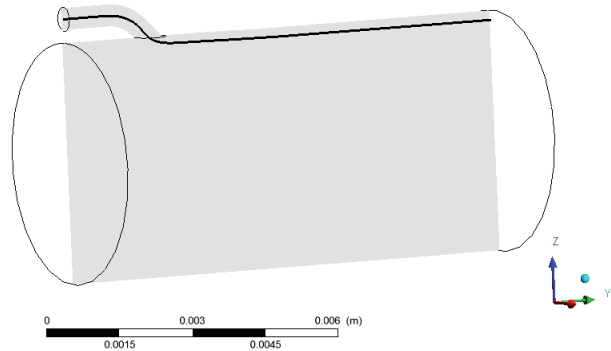


Рис. 3. Траєкторія руху датчика при $\Delta P_B/\Delta P = 2$

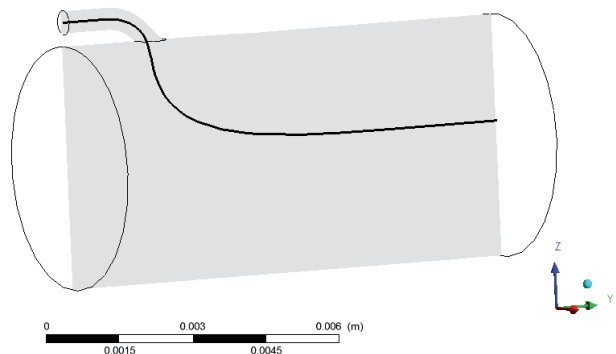


Рис. 4. Траєкторія руху датчика при $\Delta P_B/\Delta P = 50$

Враховуючи, що створення значного відношення тисків у каналі може викликати певні складності, на етапі проектування необхідно визначити оптимальні конструктивні параметри. Для визначення оптимального куту розташування додаткового каналу по відношенню до основного було здійснено ряд числових моделювань у діапазоні кутів від 10° до 80° при $\Delta P_B/\Delta P = 25$. Результати дослідження зображені на рис. 5.

Як видно з рис. 5, найбільша глибина введення датчиків досягається при куті нахилу додаткового каналу у 25°.

З метою визначення залежності глибини введення датчиків у потік матеріалу від відношення тисків було проведено серію числових моделювань при куті нахилу додаткового каналу 25° . Результати зображено на рис. 6.

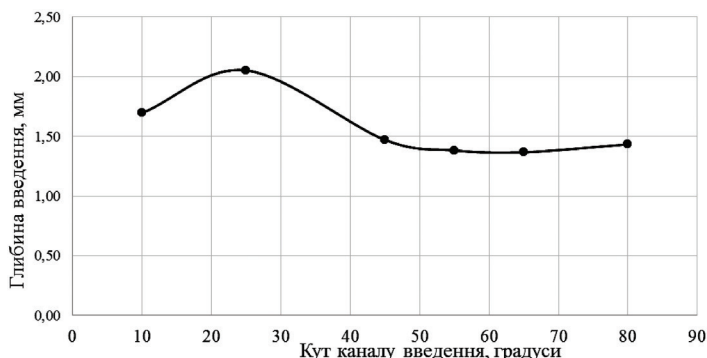


Рис. 5. Залежність глибини введення датчика від куту розташування каналу

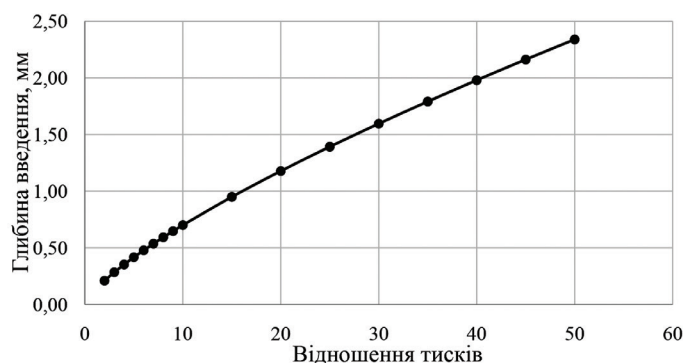


Рис. 6. Залежність глибини введення датчика від відношення тисків

Залежність, зображена на рис. 5, має степеневий характер та описується виразом:

$$h = 0,125 \left(\frac{\Delta P_b}{\Delta P} \right)^{0,749}, \quad (8)$$

при величині достовірності апроксимації 0,99.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. Серед сильних сторін даного дослідження варто виділити встановлення оптимальних конструктивних параметрів та величин впливу технологічних параметрів процесу екструзії полімерного композиційного матеріалу з інтегрованими інтелектуальними датчиками на глибину занурення датчиків у розплав. Практичне використання отриманих даних при проектуванні та налаштуванні обладнання для введення інтелектуальних датчиків полягає у підвищенні точності введення датчиків на необхідну глибину.

Weaknesses. Слабкими сторонами даного дослідження є відсутність дослідження для каналів більш складних геометричних форм, зокрема кільцевих, прямокутних та плоскощільних. У каналах складної геометричної форми закономірності технологічних параметрів можуть значно відрізнятись від отриманих в дослідженні. Таким чином, сфера застосування даного дослідження обмежена циліндричними та наближеними до циліндричних каналами.

Opportunities. Подальші дослідження полягають у моделюванні введення інтелектуальних датчиків у канали інших конфігурацій та канали складної форми. Адже саме профільні канали становлять більшість серед формуючого інструменту. Одним з перспективних напрямів дослідження є отримання методики розрахунку необхідних технологічних параметрів для введення датчиків на необхідну глибину в канали довільної конфігурації.

Threats. Складності у використанні результатів дослідження можуть полягати у розбіжності робочих режимів та можливостей конкретних моделей переробного обладнання та особливостей їх використання. Зокрема, необхідно ще спроектувати та створити допоміжне обладнання, яке зможе забезпечити необхідний перепад тиску у додатковому технологічному каналі для введення датчиків на необхідну глибину.

8. Висновки

Проведене моделювання дозволило встановити необхідні технологічні режими при введенні інтелектуальних датчиків на необхідну глибину у розплав полімерного матеріалу, зокрема:

1. Обрано фізичну модель та визначено параметри математичної моделі для проведення розрахунку, а саме: розмір елемента скінченно-елементної моделі (0,1 мм), властивості матеріалу та граничні умови, зокрема пристінне ковзання, що має суттєвий вплив на процес.

2. Проведено ряд числових моделювань процесу введення датчиків у розплав полімерного матеріалу з використанням різних кутів введення датчиків у канал, в діапазоні від 10° до 80° ,

та різних граничних умов моделі, зокрема відношень тисків у основному і додатковому каналі в діапазоні від $\Delta P_b/\Delta P = 2$ до $\Delta P_b/\Delta P = 50$.

3. Отримано оптимальну величину кута введення датчика, що становить 25° , та емпіричне рівняння впливу відношення тиску у додатковому та основному каналі на глибину введення датчика за допомогою апроксимації залежності, отриманої при числовому моделюванні, що має степеневий характер.

Література

1. Михайлин, Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы [Текст] / Ю. А. Михайлин. — СПб.: Научные основы и технологии, 2008. — 660 с.
2. Wallace, G. G. Intelligent polymer systems-concepts, approaches present uses and potential applications [Text] / G. G. Wallace // Material Forum. — 1992. — Vol. 16, № 2. — P. 111–115.
3. Wallace, G. G. Conductive Electroactive Polymers: Intelligent Polymer Systems [Text] / G. G. Wallace, P. R. Teasdale, G. M. Spinks, L. A. Kane-Maguire. — Ed. 3. — Northwest: CRC Press, 2008. — 263 p. doi:10.1201/9781420067156
4. Barisci, J. N. Conducting polymer sensors [Text] / J. N. Barisci, C. Conn, G. G. Wallace // Trends in Polymer Science. — 1996. — Vol. 4, № 9. — P. 307–311.
5. Carpi, F. Biomedical Applications of Electroactive Polymer Actuators [Text] / F. Carpi, E. Smela. — Chichester: Wiley, 2009. — 496 p. doi:10.1002/9780470744697
6. Hoffman, A. S. «Intelligent» polymers in medicine and biotechnology [Text] / A. S. Hoffman // Macromolecular Symposia. — 1995. — Vol. 98, № 1. — P. 645–664. doi:10.1002/masy.19950980156

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 моделирование процесса введения интеллектуальных датчиков, применяемых для мониторинга ответственных деталей и узлов, в том числе их напряженно-деформированного состояния, в расплав полимерного композиционного материала во время экструзии. Установлены оптимальные параметры математической модели, оптимальные конструктивные параметры и величины влияния технологических параметров процесса на глубину погружения датчиков в расплав.

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

УДК 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