

Гладченко А.Н.,*
Шевеля В.В.,**
Кияница Е.В.,*
Зверлин В.Г.*

*ЗАО «Пластмаш»,

г. Киев, Украина

**Жешувский технический университет,

г. Жешув, Польша

ИЗНАШИВАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ ПРИ ИХ ПЕРЕРАБОТКЕ В ЭКСТРУДЕРАХ

УДК 621.891

Основными факторами, определяющими эксплуатационный ресурс оборудования для переработки полимерных материалов, являются износостойкость рабочих органов и изнашивающая способность наполненных полимерных композиций. На основе усталостной концепции изнашивания металла абразивом, закрепленным в полимерной матрице, обладающей вязкоупругими свойствами, построена математическая модель, позволяющая связать сопротивление изнашиванию сплавов с их реологическими свойствами. Введен в рассмотрение реологический показатель, характеризующий упруго-пластические свойства изнашиваемого материала. Экспериментальная проверка модели изнашивания проведена на сплавах железа, никеля, кобальта, а также на твердых сплавах. Исследована зависимость интенсивности изнашивания исследуемых сталей и сплавов от относительной твердости наполнителей полимера СФД применительно к процессу переработки в экструдерах.

Ключевые слова: экструзия, износостойкость, наполненные полимеры, изнашивающая способность, реологические свойства, относительная твердость наполнителя

Введение

Основой для производства широко применяемых изделий из пластмасс являются технологические линии, базовой машиной в которых являются экструдеры. При большом разнообразии конструкций и типоразмеров эти устройства объединяет физико-химия процесса экструзии: механическая энергия, подводимая к шнеку, за счет внешнего и внутреннего трения преобразуется в теплоту, изменяя агрегатное состояние перерабатываемого материала и его реологические свойства. При этом в основной полимер для улучшения его эксплуатационных свойств вводится определенная номенклатура веществ (термостабилизаторы, красители, армирующие волокна, дисперсные порошки), существенно влияющих на физико-механические свойства получаемых композиций по сравнению с исходным полимером. Поскольку упомянутые наполнители обладают, как правило, абразивным действием, необходимо обеспечить износостойкость шнека и цилиндра при эксплуатации экструдеров.

Переработка композиций, наполненных абразивными материалами, резко повышает интенсивность изнашивания рабочих органов, увеличивая радиальный зазор между ними. Это требует повышения частоты вращения шнека для компенсации падения давления экструзии, а значит - увеличения удельного расхода энергии и общих издержек производства [1 - 3].

Таким образом, знание закономерностей трения и изнашивания рабочих органов экструдера при переработке наполненных пластмасс и обеспечение их износостойкости является важным условием оптимизации параметров технологического процесса.

Методики исследования

Для экспериментального определения изнашивающей способности наполненных полимеров проводили триботехнические испытания на модернизированной установке, выполненной на базе машины трения модели 2101ТП [4]. По торцевой поверхности дискового металлического образца осуществлялось трение трех штырьевых образцов из полимерного материала, закрепленных в гнездах кассеты через каждые 120° по дуге окружности ($d = 33,5$ мм). Износ металлических образцов определяли весовым методом (с погрешностью не более 10^{-4} г) с пересчетом на объем.

Упруго-пластические свойства изнашиваемых материалов оценивали по кинетическим диаграммам микровдавливания алмазного индентора [5].

Результаты исследований и их обсуждение

При переработке полимерных материалов в качестве основных факторов, определяющих рабочий ресурс оборудования, выступают износостойкость металлических рабочих органов и изнашивающая способность полимерной среды. Эксперименты показывают [2], что взаимодействие закрепленных в полимерной матрице частиц наполнителя с металлической поверхностью контртела (цилиндра, шнека) но-

сит характер многократного упруго-пластического деформирования микрообъемов металла, вызывающего накопление усталостных повреждений.

Для моделирования процесса абразивного изнашивания металлического контртела в контакте с полимерным материалом матрично наполненного типа принимаем, что изношенный объем V пропорционален объему материала, деформированного упруго-пластически V_{yn} :

$$V_M = C \cdot V_{yn}, \quad (1)$$

где C – коэффициент, зависящий от свойств наполненного полимера и металлического контртела.

Объем упруго-пластически деформируемого материала при взаимодействии абразивного зерна с поверхностью контртела можно смоделировать с помощью кинетической диаграммы микровдавливания индентора с исключением упругой деформации (рис. 1).

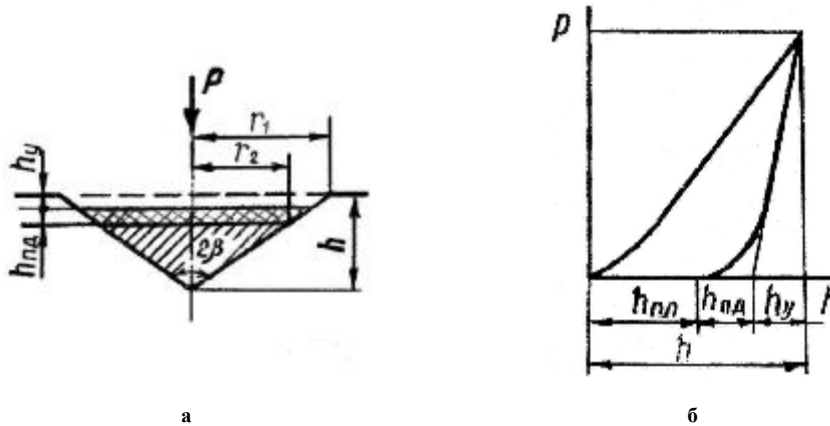


Рис. 1 – Модель вдавливания конусного индентора:
а – контур вдавливания;
б – диаграмма вдавливания

При деформировании материала на глубину h и последующем снятии нагрузки вначале исчезает упругая составляющая деформации h_y , а затем происходит некоторое дополнительное уменьшение глубины деформации на величину $h_{ндд}$, связанное с упругим последствием, которое определяют как процесс релаксации энергии, накопленной при деформации [5].

При смещении абразивной частицы под действием тангенциальной силы площадь поперечного сечения износа (на рис. 1, а заштрихована), возникающего за счет упруго-пластической деформации, равна:

$$S = r_2 \cdot (h - h_y - h_{ндд}) = r_2 \cdot h_{yn}. \quad (2)$$

Учитывая, что радиус пластического отпечатка:

$$r_2 = h_{yn} \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (3)$$

можно записать:

$$S = h_{yn}^2 \cdot \operatorname{tg} \beta \approx (h - h_y)^2 \cdot \operatorname{tg} \beta = h^2 \left[1 - 2 \cdot \frac{h_y}{h} + \left(\frac{h_y}{h} \right)^2 \right] \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (4)$$

Невосстановленная микротвердость H_h (твердость под нагрузкой) определяется из выражений:

$$H_h = \frac{P}{\pi \cdot r_1^2}; \quad r_1 = h \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (5)$$

из которых следует:

$$h^2 = \frac{P}{\pi \cdot H_h \cdot \operatorname{tg}^2 \beta}. \quad (6)$$

После подстановки (6) в (4) получаем:

$$S = \frac{P}{\pi \cdot \operatorname{tg} \beta} \cdot \frac{(h_{yn}/h)^2}{H_h}. \quad (7)$$

При смещении частицы абразива на величину L объем деформированного материала:

$$V_{yn} = S \cdot L = \frac{L \cdot P}{\pi \cdot \operatorname{tg} \beta} \cdot \frac{(h_{yn} / h)^2}{H_h}, \quad (8)$$

где L – путь трения;

P – нормальная нагрузка.

Таким образом, с учетом (1), получаем величину объемного износа:

$$V_M = \frac{C \cdot L \cdot P \cdot R}{\pi \cdot \operatorname{tg} \beta}, \quad (9)$$

где

$$R = (h_{yn} / h)^2 \cdot H_h^{-1} \quad (10)$$

является реологическим показателем, учитывающим упруго-пластические свойства изнашиваемого материала.

Физический смысл параметра R поясняется схемой, представленной на рис. 2, характеризующей зависимость износа V от твердости металла H_h в связи с соответствующим вкладом составляющих суммарной энергии W_C , расходуемой на абразивное изнашивание.

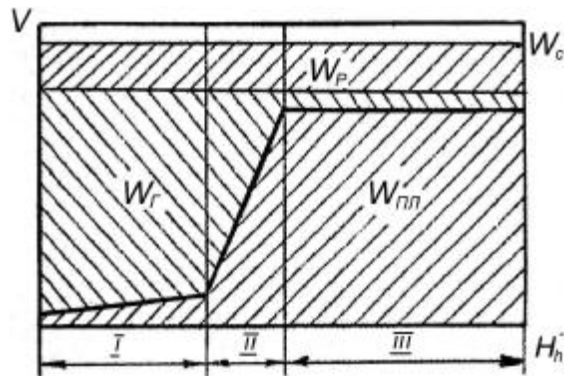


Рис. 2 – Схема зависимости износа V и вклада составляющих расходуемой энергии (W_p , W_g , W_{nl}) от твердости металла

Суммарную энергию W_C можно представить в виде суммы:

$$W_C = W_p + W_g + W_{nl}, \quad (11)$$

где W_p – энергия, рассеиваемая по механизмам амплитуднонезависимого (релаксационного) внутреннего трения;

W_g – энергия, соответствующая гистерезисному внутреннему трению;

W_{nl} – энергия, расходуемая на микропластическую деформацию.

Зависимость $V = f(H_h^{-1})$ имеет трехстадийный характер. В области I скорость изнашивания минимальна и удельная доля повреждающей составляющей рассеяния энергии W_{nl} / W_C в общем балансе энергии незначительна. В области III скорость изнашивания и отношение W_{nl} / W_C максимальны. Область II является промежуточной.

Показатель R , будучи пропорциональным величине $W_{nl} / W_C \cdot H_h$, отражает влияние на износ материала соотношения повреждающих (W_{nl}) и неповреждающих (W_p , W_g) составляющих механической энергии, рассеиваемой при трении.

Коэффициент пропорциональности C в формуле (9) зависит от твердости, дисперсности и концентрации наполнителя, а также от системы легирования изнашиваемого металлического материала, с учетом чего указанный коэффициент можно представить в виде:

$$C = K_H \cdot K_L, \quad (12)$$

где K_H – фактор, учитывающий твердость, дисперсность и концентрацию наполнителя;

K_L – фактор, зависящий от системы легирования сплава (вида сплава).

С учетом сказанного, выражение для объемного износа металла в контакте с полимером, содержащим абразивный наполнитель, принимает вид:

$$V_M = K_H \cdot K_L \cdot \frac{L \cdot P}{\pi \cdot \operatorname{tg} \beta} \cdot R \quad (13)$$

Из этого выражения следует, что для данного полимерного композита интенсивность износа металлического контртела пропорциональна реологическому показателю R сплава и зависит от системы его легирования.

Для экспериментальной проверки рассмотренной модели изнашивания было выбрано четыре группы материалов (системы легирования): сплавы на основе железа, никеля, кобальта и твердые сплавы (табл. 1).

Таблица 1

Сплавы для испытаний на изнашивание

№ п/п	Сплавы	Микротвердость, кгс/мм ²
I. Сплавы на основе железа		
1	Сталь 40X, зак.	207
2	Сталь 40XH2MA, аз.	746
3	Сталь 38X2MЮА, аз.	868
4	Сплав АН-148	796
5	Сплав ПН-АН2	452
6	Чугун № 1 (эксп)	746
7	Чугун № 2 (эксп)	854
8	Чугун № 3 (эксп)	941
II. Сплавы на основе никеля		
9	ПГ-СР2	320
10	ПГ-СР3	432
11	ПГ-СР4	620
12	ПГ-АН6	804
III. Сплавы на основе кобальта		
13	110X27K61M5H3 (эксп)	361
14	АН34 (Co-Cr-W-Si-B)	525
15	160X29K60B8 (эксп)	467
16	180X30K55B12 (эксп)	580
17	С-6 (Co-Cr-W)	863
IV. Твердые сплавы		
18	ВК6 (WC-Co)	565
19	ВК8 (WC-Co)	478
20	ВК15 (WC-Co)	444

Выбранные конструкционные стали и чугуны традиционно применяются для изготовления рабочих органов экструдеров. Исследованные наплавочные материалы разных систем легирования и твердые сплавы являются перспективными для применения в оборудовании для переработки композиционных термопластов. Наплавку сплавов на стальные образцы (Ст20) производили плазменным методом.

В качестве полимерного материала был выбран сополимер формальдегида с диоксоланом (СФД). Для приготовления композиций наполнителями служили высокодисперсные оксиды (табл. 2) зернистостью 40/28 мкм, вводимые в количестве 30 % мас.

Таблица 2

Оксиды для приготовления композиций

Оксид	Микротвердость, ГПа	Оксид	Микротвердость, ГПа
FeO	4,6 - 5,5	MgO	11 - 12,6
CaO	6,0 - 6,15	ZrO ₂	13,6 - 16,0
SiO ₂	9,5 - 10,5	Al ₂ O ₃	20 - 21

Испытания материалов на изнашивание производились в контакте с наполненными полимерами в твердом агрегатном состоянии в условиях, отвечающих режимам переработки в зонах загрузки и сжатия экструдера ($P = 140$ Н; $v = 0,3$ м/с). Штыревые образцы из исследуемой композиции, трущиеся по торцевой поверхности дискового металлического образца, моделировали единичные гранулы перерабатываемого полимера.

Реологический показатель R , входящий в выражение (13) и характеризующий упруго-пластические свойства изнашиваемых материалов, рассчитывали по кинетическим диаграммам микродавливания алмазной пирамиды и значениям микротвердости согласно (10).

На рис. 3 представлены зависимости интенсивности объемного износа V сталей и сплавов различных систем легирования от реологического показателя R при трении с композицией СФД+30% Al_2O_3 .

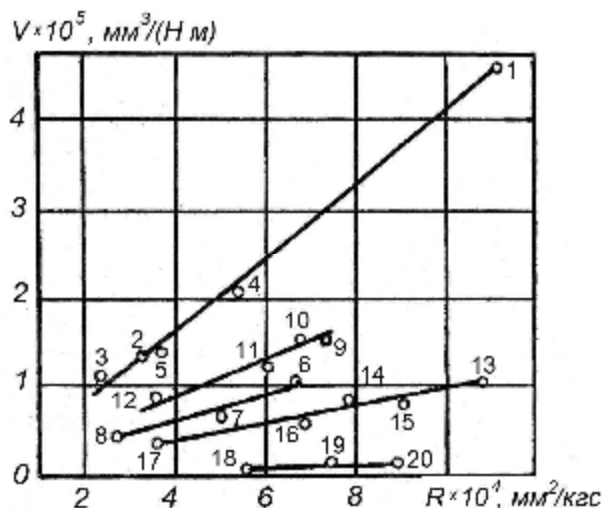


Рис. 3 – Интенсивность износа сталей и сплавов при трении с композицией СФД+30% Al_2O_3 в зависимости от реологического показателя R .

Цифры у точек соответствуют номерам материалов, приведенных в табл. 1

Для сплавов одной системы легирования наблюдается линейная зависимость в соответствии с выражением:

$$V = \frac{V_M}{L \cdot P} = \frac{K_H \cdot K_L}{\pi \cdot \text{tg}\beta} \cdot R = C_L \cdot R, \quad (14)$$

где C_L – коэффициент, зависящий от системы легирования материалов (при трении с данным композитом), равный для сплавов на основе железа – 1,0; никеля – 0,52; кобальта – 0,23; чугунов – 0,28; твердых сплавов – 0,03.

Из рис. 3 следует, что соотношение между максимальными и минимальными значениями коэффициента C_L , характеризующее относительную износостойкость сплавов различных систем легирования, равно 34, что свидетельствует о широком диапазоне их эксплуатационных возможностей.

При данной дисперсности и концентрации наполнителя наиболее значимым фактором, определяющим интенсивность изнашивания металлического контртела, является твердость этого наполнителя. Обычно влияние твердости наполнителя оценивается по относительному показателю $\Pi = H_a/H_m$, где H_a и H_m – значения твердости абразива и изнашиваемого материала.

За счет комбинирования отобранных для исследования материалов пар трения (табл. 1 и 2) получен широкий диапазон величин относительной твердости Π , который охватывает основные случаи, имеющие место на практике. На рис. 4 представлена зависимость приведенного объемного износа исследуемых сталей и сплавов от относительной твердости наполнителей полимера СФД. Приведенный износ нормировался по следующим факторам: L , P , $\text{tg}\beta$, C_L :

$$V_{\text{нр}} = \frac{V \cdot \text{tg}\beta}{L \cdot P \cdot C_L} \quad (15)$$

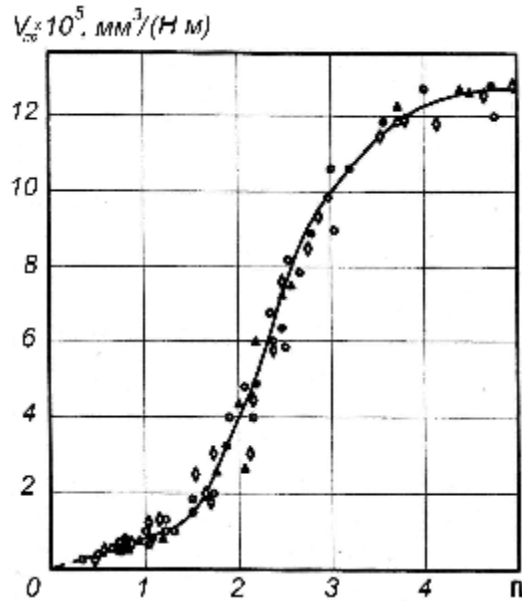


Рис. 4 – Приведенный объемный износ ($V_{св}$) сталей и сплавов в контакте с композициями на основе полимера СФД в зависимости от относительной твердости наполнителя (Π) (сплавы на основе: \circ – железа, \bullet – никеля, \diamond – кобальта; \blacktriangle – твердые сплавы)

Зависимость имеет трехстадийный характер, подобный ранее рассмотренной схеме (рис. 2). Видно, что интенсивности изнашивания минимальны при $\Pi < 1,6$. В диапазоне значений $1,6 < \Pi < 3,4$ изнашивание металлического контртела резко возрастает, а при $\Pi > 3,4$ интенсивность износа максимальна и стабильна по величине. Указанные значения величины Π , соответствующие трем стадиям влияния этого показателя на изнашивание, отличаются от таковых при трении по абразивному кругу или при ударно-абразивном изнашивании [6]. По-видимому, это связано со специфическими условиями закрепления абразива в полимерной матрице, обладающей вязкоупругими свойствами.

Литература

1. Силин В.А. Динамика процессов переработки пластмасс в червячных машинах. – М.: Машиностроение, 1972. – 150 с.
2. Гладченко А.Н., Зверлин В.Г., Петренко С.Д., Шевеля И.В. Износостойкость оборудования для переработки полимерных материалов. – К., 1997. – 256 с.
3. Зверлин В.Г. Исследование предельно-допустимого износа рабочих органов червячных пресов // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1982, № 9. – С. 20-22.
4. Гладченко А.Н., Шевеля И.В. Реология износостойкости металлополимерных трибосистем. – Хмельницкий: Универ, 2001. – 183 с.
5. Булычев С.И., Алехин В.Г. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
6. Добровольский А.Г., Кошеленко П.И. Абразивная износостойкость материалов. Справочное пособие. – К.: Техника, 1989. – 128 с.

Поступила в редакцию 11.09.2013

Gladchenko A.N., Shevelya V.V., Kianyca E.V., Zverlin V.G. **Wear out capability of filed polymers subject to their processing in extruder.**

The basic factors, that define the operation life of the equipment for the processing of polymer materials, are wear resistance of operative parts and wear out capability of filled polymer materials. Mathematic model on the basis of fatigue conception of the wear of metals by abrasive, fixed in the polymer matrix, that are possessed of viscoelastic properties was built. This model allows to bind wear resistance of alloy materials and their rheological properties. The rheological index that characterizes elasto-plastic properties of wearing material was introduced for consideration. The experimental verification of the model was examined on the iron alloys of nickel, cobalt as well as on hard alloys. The dependence of wear rate of mentioned alloys on relative solidity of the polymer fillers with regard to the process of treatment in extruders was studied.

Key words: extrusion, wear resistance, field polymers, wear out ability, rheological properties, relative solidity of the filler.

Reference

1. Silin V.A. Plastic treatment process dynamics in strainer extruders. M.: Mechanical Engineering, 1972, 150 p.
2. Gladchenko A.N., Zverlin V.G., Petrenko S.D., Shevelya I.V. Endurance of the equipment for polymer materials processing. Kiev, 1997. 256 p.
3. Zverlin V.G. Study of the extreme-acceptable wear rate of driven elements of worm presses. Chemical and petrol mechanical engineering. 1982, № 9. P. 20-22.
4. Gladchenko A.N., Shevelya I.V. Endurance rheology of metal-polymeric tribosystmes. Khmelnit-skiy: Univer, 2001. 183 p.
5. Bulychev S.I., Alehin V.G. Testing of the material by continuous indentation of the indenter. M.: Mechanical Engineering, 1990, 224 p.
6. Dobrovolskiy A.G., Koshelenko P.I. Abrasive wear resistance of materials. Handbook. K.: Technol-ogy, 1989. 128 p.