

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ

CALCULATION OF BASIC PARAMETERS OF DEVICE FOR PLASTIC WASTE PROCESSING

О.Н. Сынюк^{1*}, Т.И. Кулик²

¹ Хмельницкий национальный университет

² Киевский национальный университет технологий и дизайна

УДК 621.926

O. Synyuk^{1*}; T. Kulik

¹ Khmelnytskyi National University

² Kyiv National University of Technologies and Design

РЕФЕРАТ

ПОЛИМЕРНЫЕ ОТХОДЫ, ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ, МЕХАНИЧЕСКОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ, ВАЛКОВЫЕ УСТРОЙСТВА, КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

В статье рассматривается проблема переработки полимерных отходов на валковых устройствах с возможностью дальнейшего их использования в качестве армирующих элементов композитных материалов. Целью исследования является разработка рациональной конструкции устройства для обеспечения качественного расщепления аморфно-кристаллических полимеров с минимальными энергетическими затратами. Разработана математическая модель процесса деформации полимерного материала между зубчатыми валками устройства, получены аналитические зависимости величины относительной деформации сжатия материала в зависимости от конструктивных параметров зубчатых валков. В результате проведенных исследований предложены оптимальные значения диаметра зубчатых валков, высоты зубьев и угла профиля зубьев для переработки наиболее распространенных полимерных материалов – полиэтилена, полиэтилентерефталата, полипропилена. Разработанные рекомендации могут быть использованы для изготовления энергоэффективного перерабатывающего оборудования.

ABSTRACT

POLYMER WASTE, WASTE PROCESSING, MECHANICAL SPLITTING, ROLLER DEVICES, CONSTRUCTIVE PARAMETERS, ENERGY EFFICIENCY

The article considers the problem of processing polymeric waste on roller machines with the possibility of further use as reinforcing elements of composite materials. The aim of the study is to develop a rational design of the device to ensure the qualitative splitting of amorphous-crystalline polymers with minimal energy costs. A mathematical model of the deformation process of polymeric material between the gear rolls is developed, and analytical dependences of the value of the relative deformation of the material compression are obtained depending on the design parameters of the gear rolls. As a result of the research, the optimal values of the diameter of the toothed rolls, the tooth heights and the profile angle of the teeth for the processing of the most common polymeric materials (polyethylene, polyethylene terephthalate, polypropylene) are proposed. The developed recommendations can be used for manufacturing energy-efficient processing equipment.

В современном мире непрерывно увеличивается потребление пластмасс, в связи с чем особое значение приобретает проблема их утилизации.

Полимерные отходы считаются наиболее экологически опасными, поскольку полимеры мало подвержены саморазложению. В нашей стране

* E-mail: synoleg@ukr.net (O. Synyuk)

утилизации полимеров уделяется недостаточное внимание – чаще всего такие отходы хранятся на полигонах и свалках или сжигаются в печах с остальным твердым мусором, что в обоих случаях наносит существенный урон окружающей среде. Почва и вода, контактирующие с пластиком, насыщаются вредными химическими веществами (формальдегидом, фенолом, стиролом, уретаном и т. д.). Сжигание полимерных отходов вызывает выделение ядовитых газов, в том числе диоксинов. Кроме того, важно учитывать, что подавляющее большинство пластиков производится из невозобновляемого углеводородного сырья, запасы которого ограничены. Поэтому, в условиях дефицита полимерного сырья, повторное использование материала имеет не только экологическое, но и экономическое значение – рециклинг полимеров позволяет существенно сэкономить первичное сырье и электроэнергию на производство [1–2]. Таким образом, использование вторичных ресурсов с максимальной эффективностью является крайне актуальным заданием, от решения которого зависит благополучие и безопасность как окружающей среды, так и всего человечества.

Значительная часть полимерных отходов может быть переработана для вторичного использования. Для этого необходимо выбрать рациональный способ переработки и эффективное оборудование для его реализации. Термические и химические методы утилизации полимеров, такие как пиролиз, крекинг, каталитический термолиз, деполимеризация являются эффективными, но весьма дорогостоящими технологиями, часто наносящими урон окружающей среде. Их применение оправдано в случае, когда отходы не находят практического использования и не могут быть переработаны в изделия либо введены в состав различных композиций. Поэтому наиболее распространенным и рациональным способом переработки полимерных отходов на сегодня остается механическая обработка. При таком способе отходы измельчают, очищают и подвергают агломерации или грануляции, после чего возвращают в производственный цикл. Таким образом, можно перерабатывать как отходы потребления, так и производственные отходы с дальнейшим использованием их в дорожном строительстве, в производстве строительных

материалов, мебельной фурнитуры, емкостей и пленок для упаковки и т. д.

Существует большое количество машин для переработки полимерных отходов, позволяющее получить материал заданных параметров. К перерабатываемому оборудованию выдвигается ряд требований, среди которых основными являются: качество переработки, степень дисперсности исходного материала, энергозатраты на переработку единицы объема материала, производительность оборудования. В оборудовании для механического измельчения используются различные физические эффекты – раздавливание, истирание, расщепление, удар, резка, раскалывание, ультразвуковые, температурные, кавитационные [3].

Данная работа посвящена проектированию валковых устройств. Целью исследования является разработка рациональных конструктивных параметров устройства для обеспечения качественного дробления полимерных отходов с минимальными затратами энергии.

Принцип работы валковых дробилок состоит в том, что под действием сил трения материала происходит раздавливание его между цилиндрическими валками, вращающимися с одинаковой скоростью навстречу друг к другу с последующим отсеиванием измельченного вещества. Устройства такого типа имеют ряд преимуществ: однородность формы фракции на выходе, простую механическую конструкцию, экономичность и эффективность использования, высокую надежность и безопасность.

При расчете основных параметров непрерывного процесса переработки полимерных отходов в зубчатых валках могут встречаться два типа задач:

- при заданных геометрических размерах валков (радиус и длина рабочей части) и скоростях вращения необходимо определить производительность;
- при заданной производительности необходимо определить основные геометрические размеры зубчатых валков и оптимальную скорость их вращения.

В данной работе решается вторая задача.

В процессе воздействия на полимерный материал зубчатых валков последний подвергается таким деформациям: растяжения, сжатия и изги-

бы [4]. Внутренний слой полимерного материала на вершине зубцов будет вытягиваться под действием растягивающих напряжений и сжиматься под действием напряжений изгиба (рисунок 1).

Таким образом, деформация растяжения внутреннего слоя будет компенсироваться деформацией его сжатия, а деформация наружного слоя полимерного материала увеличится за счет растяжения, имеющего место при изгибе. В результате того, что вершины и впадины зубцов имеют различные радиусы вращения, возникает тангенциальное напряжение, вызываемое силами трения.

Следовательно, при переработке полимерного материала в зубчатых валках мощность будет расходоваться на деформацию растяжения материала, деформацию сжатия и на преодоление сил трения.

С учетом вышесказанного суммарный крутящий момент представим в следующем виде:

$$T = T_{\text{раст}} + T_{\text{сж}} + T_m, \quad (1)$$

где $T_{\text{раст}}$ – момент сил, вызывающих растяжение полимерного материала; $T_{\text{сж}}$ – момент сил, вызывающих сжатие полимерного материала; T_m – момент сил трения.

В процессе прохождения между зубчатыми валками полимерный материал подвергается деформациям растяжения и сжатия по всей толщине. Расчетная схема переработки полимера представлена на рисунке 2.

Полимерный материал с исходной толщиной h_1 входит в зону действия зубчатых валков, имея на выходе из неё толщину h_2 (рисунок 2). Для расчета разрабатываемого устройства следует предварительно определить деформацию полимерного материала, необходимую для получения ориентированной структуры. Процесс перехода аморфно-кристаллических полимеров из неориентированного состояния в высокоориентированное является одной из стадий расслоения полимерных отходов на элементы, которые можно использовать в качестве армирующих элементов композитных материалов [5, 6].

Примем следующие допущения:

- релаксация деформации отсутствует;
- область влияния на полимер – только в плоскости осей зубчатых валков.

Согласно [1] деформация полимерного материала в зубчатых валках происходит в два этапа: растяжение полимерного материала между двумя зубчатыми валками и изгиб полимерного материала на вершинах зубцов.

Таким образом, согласно рисунку 2, относительное растяжение можно определить из уравнения:



Рисунок 1 – Эпюры внутренних напряжений, возникающих в полимерном материале

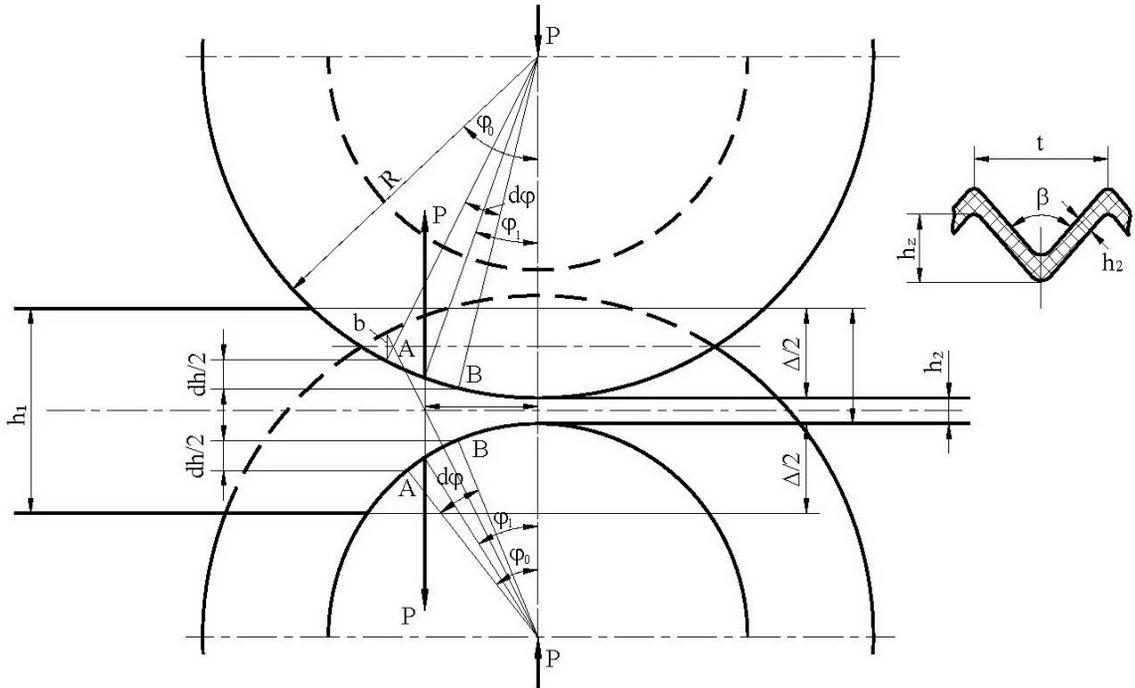


Рисунок 2 – Расчетная схема деформирования полимерного материала в зубчатых валках

$$\varepsilon_p = \frac{1 - \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} \quad (2)$$

Деформация растяжения, определённая с помощью (2), обеспечивает ориентированную структуру полимерного материала.

С другой стороны, деформация растяжения может быть определена согласно [4] следующим образом:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{E_c} (\sigma_p - 2\nu_c \sigma_{\sigma}) \sigma_p + \frac{1}{E_m} \sigma_p \quad (3)$$

Подставив (3) в (2) и решив полученное выражение относительно β , получим

$$\beta = 2 \arcsin \left(\frac{1}{\frac{1}{E_c} (\sigma_p - 2\nu_c \sigma_{\sigma}) \sigma_p + \frac{1}{E_m} \sigma_p + 1} \right) \quad (4)$$

Из уравнения (4) можно определить угол профиля зубцов валкового устройства для переработки полимерных отходов, при котором обеспечивается ориентированная структура полимерного материала, проходящего между валками.

Полимерный материал между двумя зубцами принимает вид равнобедренного треугольника (рисунок 2). Высота этого треугольника равна h_2 , основа – t . Из рисунка 3 видно, что растяжение полимерного материала начинается на участке $\varphi_0 \dots \varphi_1$ и заканчивается на участке $\varphi_0 \dots 0$. Затем полимерный материал сжимается между боковыми поверхностями зубьев (участок $\varphi_1 \dots 0$), а на участке $\varphi_0 \dots \varphi_1$ растягивается, что приводит к уменьшению толщины от начальной h_1 до $h_1(1 - \nu \varepsilon_p)$.

Коэффициент Пуассона ν полимерного материала определяем согласно [3]

$$\nu = \frac{3E_v - E}{6E_v} \quad (5)$$

где E_v – модуль объемной упругости, который может быть представлен выражением [3]

$$E_v = E_m \frac{E_c(1+\nu_m) + 2\chi^2 E_c(1-2\nu_m) + 2E_m(1-\chi^2)(1-2\nu_c)}{3[E_c(1-\chi^2)(1-2\nu_m)(1+\nu_m) + \chi^2 E_m(1+\nu_m)(1-2\nu_c) + 2E_m(1-2\nu_m)(1-2\nu_c)]}, \quad (6)$$

где χ – степень кристалличности (определяется типом кубической решетки упаковки сферолитов в материале [2]); E_c, ν_c – модуль упругости и коэффициент Пуассона сферолита (выбираются из справочной литературы); E_m, ν_m – модуль упругости и коэффициент Пуассона аморфной матрицы (выбираются из справочной литературы); E – модуль упругости полимерного материала сферолитного строения.

Модуль упругости E определяется выражением [6]

$$b = 2R \left(\frac{h_1}{2R} + \cos\varphi - 1 \right) + h_z - h_2. \quad (11)$$

Из рисунка 2, учитывая (11), определим деформацию растяжения полимерного материала:

$$\Delta l = 2 \sqrt{\left[2R \left(\frac{h_1}{2R} + \cos\varphi - 1 \right) + h_z - h_2 \right]^2 + \frac{t^2}{4}} - t \quad (12)$$

$$E_v = E_m \frac{E_c(1+\nu_m) + 2\chi^2 E_c(1-2\nu_m) + 2E_m(1-\chi^2)(1-2\nu_c)}{3[E_c(1-\chi^2)(1-2\nu_m)(1+\nu_m) + \chi^2 E_m(1+\nu_m)(1-2\nu_c) + 2E_m(1-2\nu_m)(1-2\nu_c)]}. \quad (7)$$

Согласно рисунку 2, межосевое расстояние равно

$$a = 2R \cos\varphi_0 + h_1 = R + h_1 + R - h_z, \quad (8)$$

где R – радиус зубчатых валков.

Учитывая, что $h_2 - h_1 = \varepsilon_{ct} h_1$, из уравнения (8) определим угол, при котором полимерный материал захватывается валками. В соответствии с рисунком 2 выражение для определения данного угла можно записать следующим образом:

$$\cos\varphi_0 = \frac{2R - h_z - \varepsilon_{ct} h_1}{2R}, \quad (9)$$

где ε_{ct} – деформация сжатия полимерного материала.

Изгиб полимерного материала определяется соотношением

$$b = 2R(\cos\varphi - 1) + h_z - h_2. \quad (10)$$

С учетом толщины материала выражение (10) принимает вид

и относительную деформацию

$$\varepsilon_p = \frac{2 \sqrt{\left[2R \left(\frac{h_1}{2R} + \cos\varphi - 1 \right) + h_z - h_2 \right]^2 + \frac{t^2}{4}}}{t} - 1. \quad (13)$$

На рисунке 2 видно, что в результате прохождения полимерного материала между зубцом одного валка и впадиной другого, его толщина изменяется на величину

$$\delta = -\varepsilon_{ct} h_1. \quad (14)$$

Наибольшее сжатие полимерного материала имеет место на боковой поверхности зуба, поэтому при расчете изменения толщины материала необходимо учитывать величину, которая является постоянной для определенного перерабатываемого устройства. Учитывая вышесказанное, перепишем (14) следующим образом:

$$\delta = -\varepsilon_{ct} h_1 \sin \frac{\beta}{2} = h_1 - h_2 = -\varepsilon_{ct} h_1 \sin \frac{\beta}{2}. \quad (15)$$

Решая уравнение (15) относительно угла с учетом уравнений (8) и (9), получим следующее

выражение:

$$\cos \varphi = 1 - \frac{\varepsilon_{\alpha} h_1}{(2R - h_z) \sin \frac{\beta}{2}} \quad (16)$$

При угле вращения зубчатых валков φ_1 расстояние между боковыми поверхностями зубьев будет равняться конечной толщине полимерного материала h_2 , то есть $h_1(1 - \nu\varepsilon_p)$. Тогда из уравнения (16) косинус угла φ_1 равен

$$\cos \varphi_1 = \frac{(2R - h_z) \sin \frac{\beta}{2} - h_1(1 - \nu\varepsilon_p)}{(2R - h_z) \sin \frac{\beta}{2}} \quad (17)$$

Результаты вычислений по формуле (17) представлены на рисунке 3.

По рисунку 3 можно определить, что разница между значениями углов вращения зубчатых валков, при которых заканчивается упругая и начинается пластическая деформация полимерных материалов, составляет величину меньше 1° . Таким образом, в дальнейших расчетах можно использовать значение угла вращения зубчатых валков, при котором начинается пластическая деформация полимерного материала. Так, для полиэтиленовой пленки это соответствует деформации $\varepsilon_p = 0,85$; для полиэтилентерефата-

лата $\varepsilon_p = 0,93$; для полипропиленовой пленки $\varepsilon_p = 0,78$ [7].

Из уравнения (16) с учетом выражения (14) получим выражение для определения толщины полимерного материала при определенном угле вращения зубчатых валков:

$$\delta = (2R - h_z) \sin \frac{\beta}{2} (\cos \varphi - 1) \quad (18)$$

На рисунке 4 приведены графические зависимости толщины δ полимерного материала от угла вращения зубчатых валков φ при различных значениях угла профиля зубцов β .

На графиках можно видеть, что чем больше угол профиля зубьев, тем больший требуется угол вращения валков для получения заданной толщины полимерного материала, при которой начинается его пластическая деформация. А больший угол вращения зубчатых валков требует большего расхода электрической энергии.

Для обеспечения необходимого усилия прижатия полимерного материала к вершинам зубцов, при котором отсутствует скольжение материала по боковой поверхности зуба, необходимо, чтобы угол профиля был как можно меньше. Кроме того, как известно [4], чем меньше угол профиля зубьев, тем большей будет деформация полимерного материала.

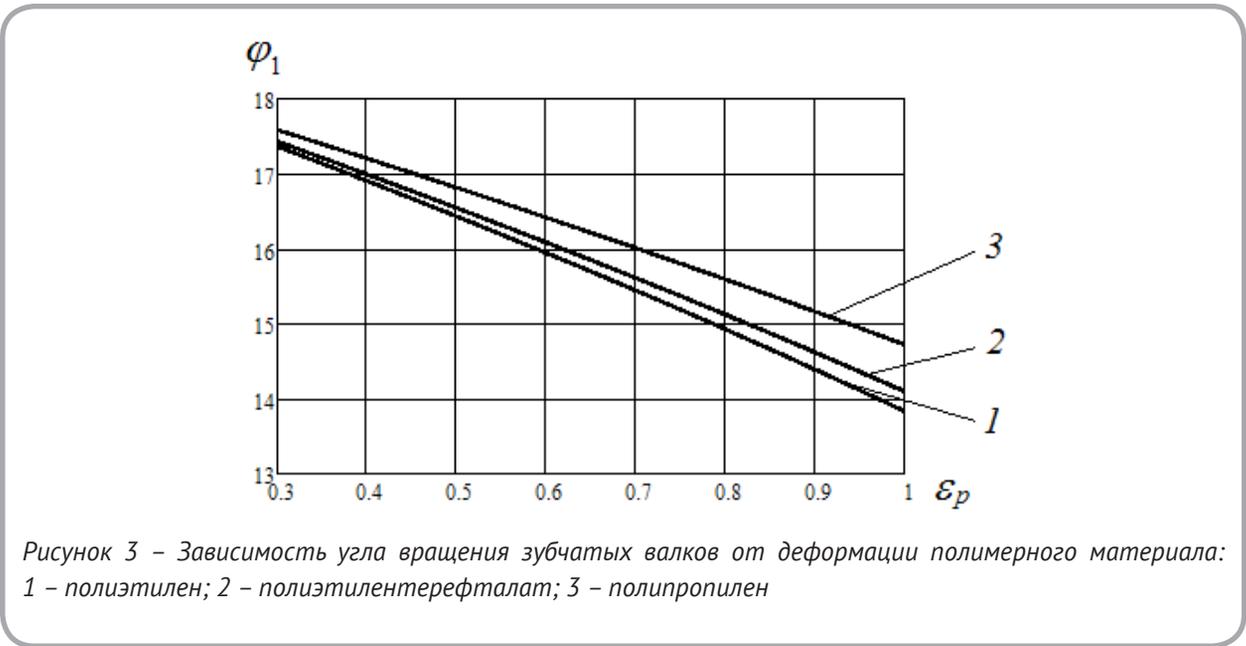


Рисунок 3 – Зависимость угла вращения зубчатых валков от деформации полимерного материала: 1 – полиэтилен; 2 – полиэтилентерефталат; 3 – полипропилен

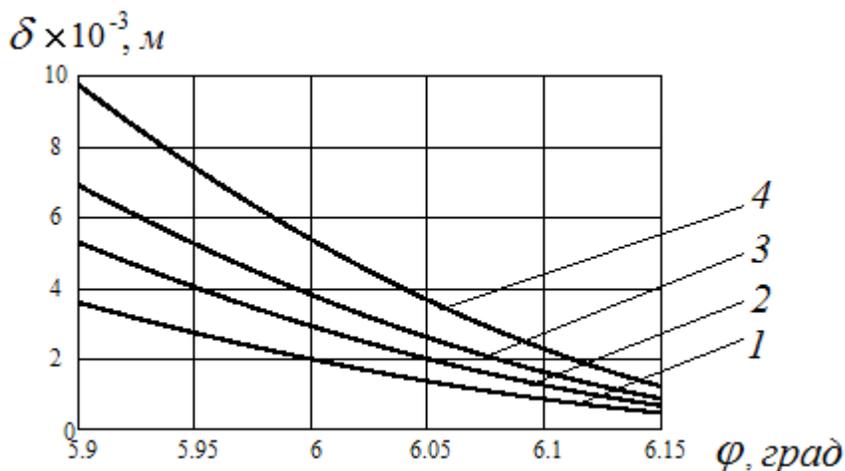


Рисунок 4 – Зависимость толщины полимерного материала от угла вращения зубчатых валков при значениях угла профиля зубьев: 1 – $\beta = 30^\circ$; 2 – $\beta = 45^\circ$; 3 – $\beta = 60^\circ$; 4 – $\beta = 90^\circ$

С другой стороны, угол профиля зубьев должен быть не менее критического значения, при котором возможно разрушение самих зубьев.

В дальнейшем будет проведен силовой расчет процесса деформации полимерного материала в зубчатых валках, который определит минимальное значение угла профиля зубцов.

При вращении зубчатых валков на угол $d\varphi$ толщина полимерного материала изменится на $d\delta$, то есть:

$$d\delta = -(2R - h_z) \sin \frac{\beta}{2} \sin \varphi d\varphi. \quad (19)$$

Относительную деформацию сжатия $\varepsilon_{сж}$ определим из зависимости

$$d\varepsilon_{сж} = \frac{-(2R - h_z) \sin \frac{\beta}{2} \sin \varphi}{h_1(1 - \nu\varepsilon_p)} d\varphi. \quad (20)$$

Проинтегрировав (20), получим

$$\varepsilon_{сж} = \frac{(2R - h_z) \sin \frac{\beta}{2} \cos \varphi}{h_1(1 - \nu\varepsilon_p)} + C_1. \quad (21)$$

Для определения постоянной интегрирования воспользуемся начальными условиями деформации полимерного материала, то есть

$\varepsilon_{сж} = 0$ при $\varphi = \varphi_I$:

$$C_1 = -\frac{(2R - h_z) \sin \frac{\beta}{2}}{h_1(1 - \nu\varepsilon_p)} \cos \varphi_I. \quad (22)$$

Подставив значение постоянной интегрирования в (21) получим выражение для определения максимальной относительной деформации сжатия полимерного материала при прохождении его между зубчатыми валками:

$$\varepsilon_{сж} = \frac{(2R - h_z) \sin \frac{\beta}{2}}{h_1(1 - \nu\varepsilon_p)} (\cos \varphi_0 - \cos \varphi_I). \quad (23)$$

С целью фиксации полимерного материала в растянутом состоянии следует подвергнуть его сжатию, что можно осуществить, вращая зубчатые валки на угол от φ_0 до φ_I , где φ_0 – угол, при котором начинается упругая деформация полимерного материала, а φ_I – угол, при котором заканчивается упругая и начинается пластическая деформация полимерного материала (определяются из уравнения (17)). При этом уменьшается прочность полимерного материала в направлении, перпендикулярном растяжению. Далее ослаблен полимерный материал пропус-

кают между валками, имеющими профиль Рьоло.

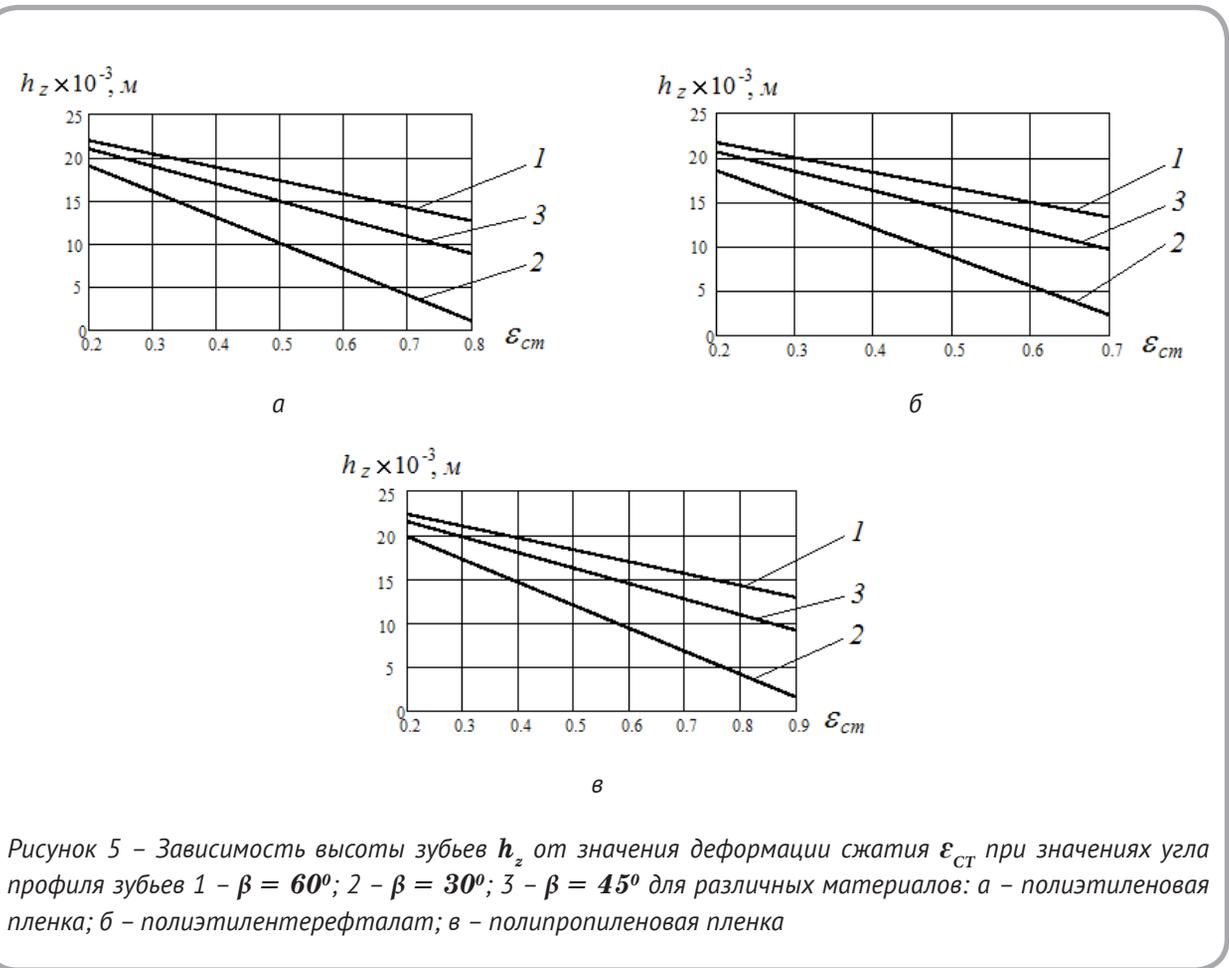
Определяемая по выражению (23) деформация сжатия ϵ_{CT} которую обеспечивает устройство с вращающимися зубчатыми валками, не должна быть меньше значения деформации сжатия $\hat{\epsilon}_2$, полученной из [8], которая обеспечивает пластическую деформацию в направлении, поперечном к направлению извлечения полимерного материала. В результате осуществляется фиксация растянутого полимерного материала.

На рисунке 5 приведена зависимость высоты зубьев h_z от значения деформации сжатия ϵ_{CT} при разных углах профиля зубьев для следующих полимерных материалов:

- полиэтилена ($E_c = 1020$ МПа, $\nu_c = 0,37$; $E_m = 77$ МПа, $\nu_m = 0,39$; $\chi = 0,68$);
- полиэтилентерефталата ($E_c = 8239$ МПа, $\nu_c = 0,32$; $E_m = 2000$ МПа, $\nu_m = 0,39$; $\chi = 0,40$);
- полипропилена ($E_c = 2500$ МПа, $\nu_c = 0,32$; $E_m = 92$ МПа, $\nu_m = 0,45$; $\chi = 0,75$).

Анализ результатов, представленных графическими зависимостями на рисунке 5, показывает, что для обеспечения фиксации предварительно ориентированной структуры полимерного материала необходимо определить такие конструкционные параметры устройства, при которых обеспечивается нужная деформация сжатия. Так, например, для фиксации вытянутой структуры полиэтиленовой пленки (рисунок 5 а) согласно [8] необходимо обеспечить деформацию сжатия $\epsilon_c = 0,65$, которая может быть создана валками диаметром $D = 100$ мм с высотой зубьев $h_z = 8$ мм и углом профиля зубьев $\beta = 30^\circ$. Кроме того, в зависимости от толщины полимерного материала, можно изменять зазор между зубчатыми валками. Это обеспечит требуемое значение деформации сжатия для полимерных отходов различной толщины.

Аналогичный анализ графиков выполняется для полиэтилентерефталата и полипропиленовой пленки (рисунок 5 б, в).



ВЫВОДЫ

При проектировании устройства для переработки полимерных отходов необходим предварительный расчет значений его основных параметров, таких как: диаметр зубчатых валков, высота зубьев, угол профиля зубьев, частота вращения валков, при которых обеспечивается ориентированная структура полимерного материала. Полученные значения этих параметров можно использовать для изготовления энергоэффективного перерабатывающего оборудования.

Аналитические исследования влияния конструктивных параметров на деформацию растяжения и сжатия полимерного материала для обеспечения необходимой для дальнейшей переработки структуры материала позволили разработать рекомендации для переработки таких полимерных материалов:

– для переработки полиэтиленовой пленки необходимо, чтобы диаметр зубчатых валков составлял от 70 до 100 мм, рекомендуемая высота зубьев – 6 ... 8 мм, угол профиля зубьев – 30 ... 450°;

– для полиэтилентерефталата необходимо, чтобы диаметр зубчатых валков составлял от 60 до 120 мм, высота зубьев – 4 ... 6 мм, угол профиля зубьев – 40 ... 600°;

– для полипропиленовой пленки необходимо, чтобы диаметр зубчатых валков составлял от 90 до 130 мм, высота зубьев – 4 ... 8 мм, угол профиля зубьев – 45 ... 700°.

Таким образом, для переработки полимерных материалов, указанных выше, рекомендуется спроектировать устройство с вращающимися зубчатыми валками с такими конструктивными параметрами: диаметр валков $D = 100$ мм, высота зубьев $h_z = 6$ мм, угол профиля зубьев $\beta = 30^\circ$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бутко, А. Е. (2015), Украинский рынок утилизации полимерных отходов и ключевые тенденции его развития, *Молодий вчений*, 2015, № 2(17), С. 139–142.
2. Базунова, М. В., Прочухан, Ю. А. (2008), Способы утилизации отходов полимеров, *Вестник Башкирского университета*, 2008, Т. 13, № 4, С. 875–885.
3. Рубанка, М. М., Місяць, В. П. (2015), Відходи легкої промисловості, способи переробки та області подальшого використання, *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*, 2015, № 4, С. 34–39.
4. Синюк, О. М. (2017), Визначення раціональних конструкційних параметрів пристроїв для переробки полімерів, *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 2017, № 3, С. 42–49.

REFERENCES

1. Butko, A. E. (2015), Ukrainian market of polymer waste recycling and key trends in its development [Ukrainskij rynok utilizacii polimernyh othodov i kljuchevye tendencii ego razvitija], *Molodij vchenij*, 2015, № 2(17), pp. 139–142.
2. Bazunova, M. V., Prochukhan, Yu. A. (2008), The methods of polymer waste recycling [Sposoby utilizacii othodov polimerov], *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2008, T. 13, № 4, pp. 875–885.
3. Rubanka, M. M., Misiats, V. P. (2015), Waste of light industry, types of recycling and the follow-use [Vidhodi legkoї promislovosti, sposobi pererobki ta oblasti podal'shogo vikoristannja], *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*, 2015, № 4, pp. 34–39.
4. Synyuk, O. M. (2017), Determination of rational structural parameters of devices for polymer processing [Vyznachennja racional'nih

5. Синюк, О. М., Скиба, М. Е. (2016), Моделювання зміни надмолекулярної структури полімерних матеріалів при орієнтаційній витяжці, *Вісник Хмельницького національного університету*, 2016, № 6, С. 45–52.
6. Синюк, О. М. (2016), Визначення пружних властивостей аморфно-кристалічних полімерів сферолітної структури, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2016, № 6, С. 77–86.
7. Ван Кревелен, Д. В. (1972), *Свойства и химическое строение полимеров*, Москва, Химия, 416 с.
8. Синюк, О. М., Михайловський, А.Ю. (2017), Визначення ефективних пружних властивостей орієнтованих полімерів в поперечному напрямку, *Вісник Хмельницького національного університету технологій та дизайну*, 2017, № 3, С. 29–38.
5. Synyuk, O. M., Skyba, M. Ye. (2016), Modelling of the change of the supramolecular structure of polymeric materials during the orientation stretching [Modeljuvannja zmini nadmolekuljarnoї strukturi polimernih materialiv pri orientacijnij vitjazhci], *Bulletin of Khmelnytskyi national university*, 2016, № 6, pp. 45–51.
6. Synyuk, O. M. (2016), Determination of the elastic properties of amorphous-crystalline polymers with spherulite structure [Viznachennja pruzhnih vlastivostej amorfno-kristalichnih polimeriv sferolitnoї strukturi], *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 2016, № 6, pp. 77–86.
7. Van Krevelen, D. V. (1972), *Svojstva i himicheskoe stroenie polimerov* [Properties and chemical structure of the polymers], Moskva, Khimiya, 416 p.
8. Synyuk, O. M. Mihajlovskij, A. Ju. (2017), Determination of effective elastic properties of oriented polymers in the transverse direction [Viznachennja effektivnih pruzhnih vlastivostej oriyentovanyh polimeriv v poperechnomu napryamku], *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*, 2017, № 3, pp. 29–38.

Статья поступила в редакцию 01. 09. 2017 г.