УДК 66.022.5 https://doi.org/10.26160/2542-0127-2026-18-151-157

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОСТАДИЙНОГО УПЛОТНЕНИЯ И УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ПОЛИМЕРОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Гаевой А.П.[1], Севостьянов В.С.[2], Проценко А.М.[2]
[1]Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», Старый Оскол;
[2]Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород

Ключевые слова: ресурсосберегающая технология, техногенные полимеросодержащие материалы, постадийный процесс, уплотнение, упругопластическое деформирование, объёмно-сдвиговая деформация, реологические зависимости.
Аннотация. В статье рассматривается механический метод переработки техногенных полимеросодержащих материалов методом постадийного диспергирования. Получены аналитические зависимости, описывающие кинетические закономерности изменения параметров уплотнения пористой среды; упругопластического, объемно-сдвигового деформирования и измельчения перерабатываемых материалов. Сформулированы основы разработки механо-реологической модели процесса измельчения полимерных материалов, необходимой для конструирования энергоэффективного оборудования и технологических перерабатывающих комплексов.

A STUDY OF THE PROCESS OF STAGED COMPACTION AND ELASTOPLASTIC DEFORMATION OF MAN-MADE POLYMER-CONTAINING MATERIALS

Gaevoy A.P.[1], Sevostyanov V.S.[2], Protsenko A.M.[2]
[1]Stary Oskol Technological Institute named after A. A. Ugarov (branch) of the National Research Technological University “MISIS”, Stary Oskol;
[2]Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Keywords: resource-saving technology, man-made polymer-containing materials, step-by-step process, compaction, elastoplastic deformation, bulk-shear deformation, rheological dependencies.
Abstract. The article examines the mechanical method of processing man-made polymer-containing materials using the stage-by-stage dispersion method. Analytical dependencies have been obtained that describe the kinetic patterns of changes in the parameters of porous medium compaction; elastic-plastic, bulk-shear deformation, and grinding of the processed materials. The foundations for developing a mechanical-rheological model of the polymer materials grinding process have been formulated; this model is necessary for designing energy-efficient equipment and technological processing complexes.

Комплексная утилизация техногенных полимеросодержащих материалов (ТПМ) относится к числу приоритетных направлений современного промышленного и экологического развития, что диктуется как необходимостью минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду, так и потребностью во внедрении ресурсо- и энергосберегающих технологий. Применение вторичных полимерных материалов даёт возможность сократить расход первичного сырья, снизить энергоёмкость производственных процессов и

существенно расширить ассортимент востребованной продукции на основе рециклинга [1].

Среди всех методов переработки ТПМ наибольшую перспективность занимают механические, предполагающие физическую обработку полимерных отходов без трансформации их химической структуры. Такой подход обеспечивает сохранение исходных физико-механических характеристик термопластов, характеризуется пониженными энергозатратами, высокой экономической рентабельностью и экологической безопасностью [2].

Практика переработки ТПМ, отличающихся разнообразием физико-механических свойств, свидетельствует о всё более широком распространении постадийных схем измельчения, позволяющих получать высокодисперсные материалы и полимерсодержащие композиционные смеси (ПКС) с введением гетерогенных компонентов [3]. Несмотря на значительный разброс характеристик ТПМ, процессы их измельчения подчиняются общим закономерностям, которые при этом имеют существенную специфику, связанную с упруго-вязко-пластической природой полимеров, их адгезионными свойствами и морфологией частиц.

Рассмотрим условия постадийного уплотнения, упругопластического деформирования и объёмно-сдвигового деформирования ТПМ при их измельчении (рис. 1).

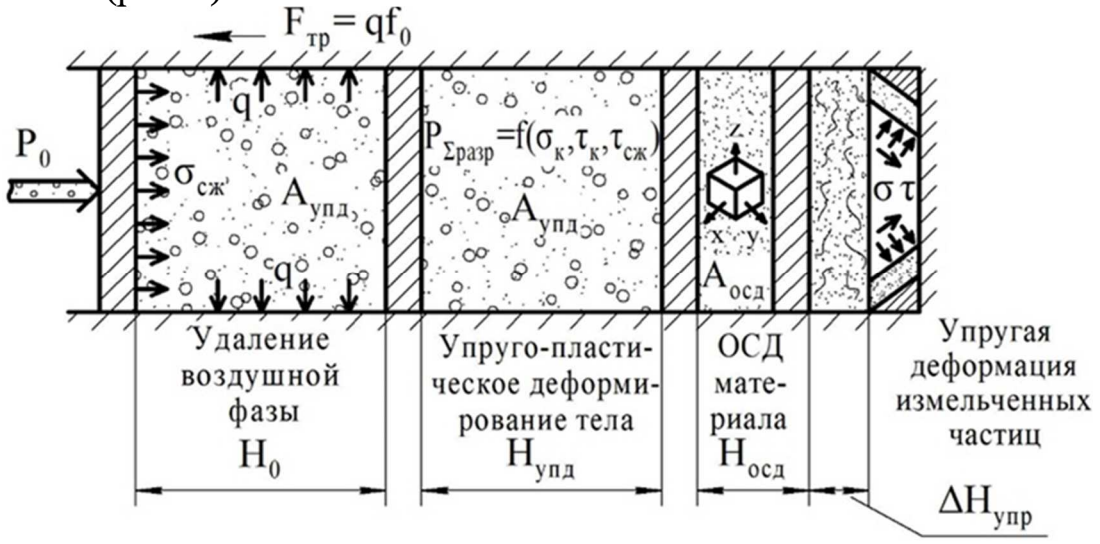


Рис. 1. Схема постадийного процесса уплотнения и измельчения мелкозернистых ТПМ

Исходный, предварительно измельченный ТПМ с низкой насыпной плотностью $\rho_{0ТПМ}$ подвергается внешнему силовому воздействию P_0. При этом под воздействием внутренних нормальных напряжений $\sigma_{сж}$ преодолеваются силы межчастичного трения $F_{м.част.тр}$, а также внешнего трения $F_{тр}$, вызванные усилием бокового распора q. При уплотнении частиц ТПМ удаляется воздушная фаза между ними, что увеличивает значения ρ_0 и транспортирующую способность измельчаемого материала. Кроме того, формирование более уплотненного материала создаёт более благоприятные условия для дальнейшего упругопластического деформирования конгломерата частиц на следующем участке.

На стадии предварительного уплотнения ТПМ энергозатраты минимальны, а на последующей возрастают пропорционально внешнему силовому

воздействию. Максимально затрачиваемая при этом работа $A_{\text{упд}}$ определяется выражением:

$$A_{\text{упд}} = P_{\Sigma\text{разр}} \cdot (H_0 + H_{\text{упд}}), (\text{Н} \cdot \text{м}), \quad (1)$$

где $P_{\Sigma\text{разр}}$ – максимальное силовое воздействие на второй стадии, Н; H_0 – ход рабочего органа на участке удаления воздушной фазы, м; $H_{\text{упд}}$ – ход рабочего органа на участке упругопластического деформирования, м.

Для повышения полезной работы измельчения ТПМ, обладающих повышенной адгезионной способностью и снижения энергозатрат при силовом воздействии, целесообразно на второй и третьей стадиях измельчения обеспечивать объёмно-пространственные нормальные σ_{xyz} и касательные τ_{xyz} напряжения.

С целью повышения энергоэффективности процесса измельчения ТПМ на основной второй стадии целесообразно использовать комплекс силовых разрушающих нагрузок $P_{\Sigma разр}$, обеспечивающих нормальные $\sigma_к$ и касательные $\tau_к$ контактные напряжения, а также сдвиговые (разрушающие) напряжения $\tau_{сдв\text{-}разр}$:

$$P_{\Sigma\text{разр}} = f(\sigma_k, \tau_k, \tau_{\text{сдв}-\text{разр}}). \quad (2)$$

Особое значение объёмно-пространственное деформирование уплотнённого тела имеет для последней стадии, где измельченный полифракционный материал обладает повышенным аутогезионным взаимодействием (сцеплением) частиц.

Кроме того, в зависимости от конструктивно-технологического исполнения рабочей камеры измельчения (повышенного силового воздействия и энергонапряженности) возможно состояние полифракционных частиц в виде монолитного тела или отдельных спрессованных тел. Указанное состояние измельченных, но спрессованных частиц требует последующей дезагломерации монотел. Как показывает практика, при незначительных касательных напряжениях τ_{xyz} процесс дезагломерации не требует значительных энергозатрат.

Указанный процесс дезагломерации уплотненных конгломератов также необходим при реализации постадийных процессов: «измельчение ТПМ – гомогенизация полимеросодержащих композиционных смесей с гетерогенными компонентами».

При отсутствии указанного дезагломерационного процесса упругое расширение уплотненного тела (особенно в «закрытых» матрицах) приводит лишь к появлению межчастичных трещин, преимущественно при высокоскоростном создании напряжений. Кроме того, последняя стадия упругой деформации монолитного тела из измельченных частиц при высоких напряжениях является наиболее энергоёмкой, что характеризуется интенсивным ростом силового воздействия P_0.

Описанный постадийный процесс уплотнения и упругопластического деформирования измельчаемых частиц можно также рассматривать при использовании реологических кривых O'A'C'D' (рис. 2).

Это необходимо для разработки механо-реологической модели процесса измельчения ТПМ, позволяющей более всесторонне изучить исследуемый технологический процесс при конструировании технических средств измельчения полимерных материалов.

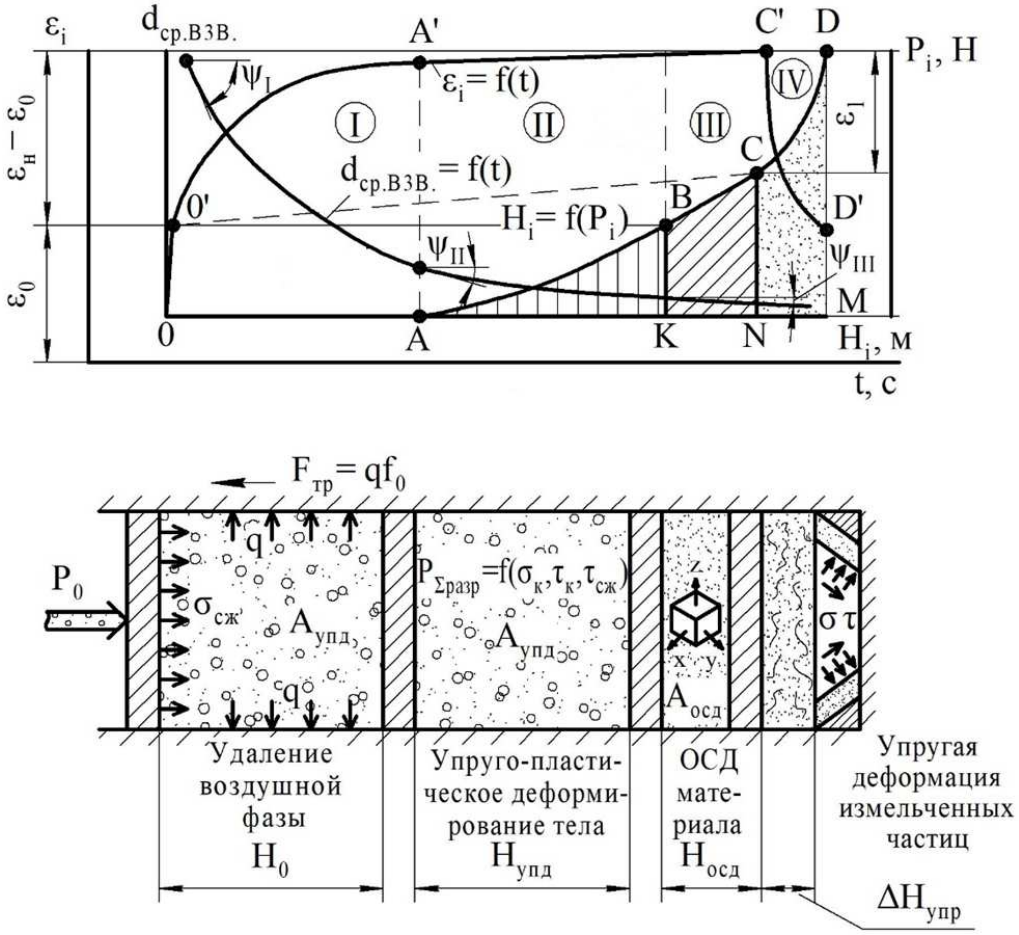


Рис. 2. Графические зависимости $H_i = f(P_i)$, $\varepsilon_i = f(t)$ и $d_{ср·взв} = f(t)$ в соответствии со стадиями процесса: стадии: I – уплотнение, II – упругопластическое деформирование, III – измельчение

Экспоненциальный характер кинетической кривой уплотнения объёмно-сдвигового деформирования и последующего разрушения частиц ТПМ ($H_i = f(P_i)$) соответствует классической кинетической кривой измельчения органоминеральных зернистых материалов различной морфологии ($d_{ср·взв} = f(t)$), что подтверждается в научных трудах различных ученых [4, 5]. Согласно указанных кинетических зависимостей (рис. 2, I) первые их стадии реализуются с максимальной скоростью.

Для кинетической кривой измельчения зависимости средневзвешенного размера частиц ($d_{ср·взв}$) от времени (t) внешнего силового воздействия – $d_{ср·взв} = f(t)$ «константа скорости измельчения» определяется тангенсом угла наклона Ψ_i касательной к оси абсцисс. С увеличением времени t – стадийности кинетических кривых, константы скорости изменения выходных параметров снижаются ($\Psi_I > \Psi_{II} > \Psi_{III}$), а энергозатраты на реализуемые процессы возрастают, что свидетельствует о целесообразности усиления постадийного объёмно-сдвигового деформирования частиц.

Характер реологических кривых упруго-вязко-пластичных материалов определяется во многом их пластическими свойствами, а также структурно-деформационными характеристиками [6]. Учитывая широкий диапазон изменения пластических свойств различных ТПМ, определяемых их морфологическим состоянием, а также термомеханическими и технологическими условиями

переработки, важное значение имеет зависимость относительной деформации материала (ε_i) от времени (t) воздействия силовой нагрузки. С учетом реального термопластичного состояния перерабатываемых ТПМ устанавливается необходимость определения констант вязко-пластичных свойств материалов: условно-мгновенного модуля упругости, модуля эластичности и наибольшей пластической вязкости [6].

Согласно исследуемого процесса предварительного уплотнения измельченных ТПМ и соответствующего удаления воздушной фазы максимальная величина относительного уплотнения ε_{Hmax} складывается из двух составляющих:

$$\varepsilon_{Hmax} = \varepsilon_{Imax} + \varepsilon_{\text{упр}II-III}, \quad (3)$$

где ε_{Imax} – максимальное относительное уплотнение измельченных частиц на первой стадии; $\varepsilon_{\text{упр}II-III}$ – упругая деформация максимально уплотненного на второй и третьей стадии (рис. 2, II, III) тела после снятия напряжений.

Соответственно указанной схемы процесса (рис. 1) имеем:

$$H_0 = \frac{V_{\text{пор}}}{S_{\text{сеч}}}, \quad (4)$$

$$H_{\text{упд}} = \frac{V_{\text{упд}}}{S_{\text{сеч}}}, \quad (5)$$

где $V_{\text{пор}}$ $V_{\text{упд}}$ – соответственно, объём порового пространства (воздушной фазы) и объём тела после упругопластического деформирования его частиц, м^3; $S_{\text{сеч}}$ – площадь сечения деформируемого тела, м^2.

Тогда первое слагаемое выражения (3) будет иметь вид:

$$\varepsilon_{Imax} = \frac{H_0}{H_{\text{упд}} + H_0}. \quad (6)$$

Соответственно, можно определить исходную насыпную плотность измельчаемого материала:

$$\rho_0 = \frac{m_{\text{ТПМ}}}{V_{\text{пор}} + V_{\text{упд}}}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}. \quad (7)$$

и величину

$$H_{\text{упд}} = \frac{m_{\text{ТПМ}}}{\gamma_{\text{уд}} \cdot S_{\text{сеч}}}, \quad (8)$$

где $m_{\text{ТПМ}}$ – масса уплотняемого ТПМ, кг; $\gamma_{\text{уд}}$ – истинная плотность твёрдого вещества, из которого состоят частицы ТПМ, без учёта пор и межчастичных пустот, кг/м^3.

Значение ε_{Imax} можно определить из выражения:

$$\varepsilon_{Imax} = 1 - \frac{\rho_0}{\gamma_{\text{уд}}}. \quad (9)$$

На третьей стадии упругопластической деформации (рис. 1) при создании условий для релаксации соответствующих напряжений и при завершении процесса абсолютная деформация напряженного тела ΔH_{III} может быть определена из равенства

$$\frac{\Delta H_{III}}{H_{ОСД}} = \frac{\overline{P}_{III}}{E}, \quad (10)$$

где $\overline{P}_{III}$ – нормальные напряжения, воздействующие на тело; E – модуль объёмной упругости деформированного тела, Н/м^2.

$$\Delta H_{III} = \frac{\overline{P}_{III}}{E} \cdot H_{ОСД}. \quad (11)$$

Тогда величина относительной упругой деформации:

$$\varepsilon_{\text{упр}III} = \frac{\overline{P}_{III}}{E} \cdot (1 - \varepsilon_{Imax}). \quad (12)$$

Скорости абсолютной $v_{\text{абс}}$ (м/с) и относительной $v_{\text{отн}}$ (с^{-1}) деформации, влияющих на процесс дезагломерации деформируемого тела, состоящего из измельченных частиц, можно определить из выражений:

$$v_{\text{абс}} = \frac{\partial(\Delta H_{III})}{\partial t}, \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (13)$$

$$v_{\text{отн}} = \frac{\partial\left(\varepsilon_{\text{упр}III}\right)}{\partial t}, \text{с}^{-1}. \quad (13)$$

Учитывая выражение

$$\partial\left(\varepsilon_{\text{упр}III}\right) = \frac{\partial(\Delta H_{III})}{H_{ОСД}}, \quad (14)$$

можно установить зависимость

$$v_{\text{отн}} = \frac{\partial(\Delta H_{III})}{\partial t} \cdot \frac{1}{H_{ОСД}} = \frac{v_{\text{абс}}}{H_{ОСД}}, \text{с}^{-1}. \quad (15)$$

Относительная деформация деформируемой шихты может быть определена по формуле [7]:

$$\varepsilon_{\text{упр}} = \frac{\overline{P}_i}{E_1} + \frac{\overline{P}_i - \overline{P}_k}{E_2} \cdot \left\{1 - e^{\left(-\frac{E_2 \cdot t}{\eta_1}\right)}\right\}. \quad (16)$$

а скорость относительной деформации

$$v_{\text{отн}} = \frac{v_\sigma}{E_1} + \frac{\overline{P}_i - \overline{P}_k}{\eta_0} \cdot e^{\left(-\frac{E_2 \cdot t}{\eta_1}\right)}, \text{с}^{-1}, \quad (17)$$

где v_σ – скорость возрастания напряжений в процессе деформационного воздействия на частицы тела.

Проведенные нами теоретические исследования позволяют описать кинетические закономерности изменения параметров уплотнения пористой среды, упругопластического, объёмно-сдвигового деформирования и измельчения перерабатываемых техногенных полимеросодержащих материалов, а также установить взаимосвязи между реологическими характеристиками ТПМ и энергосиловыми параметрами процесса их постадийной переработки

Список литературы

1. Белкина И.В. Исследование композитных материалов, полученных с применением вторичных полимеров // Наука и инновационные технологии. – 2020. – №1(14). – С. 264-277. – DOI: 10.33942/sit.nes032.
2. Раков Д.Л. Структурный синтез технологических решений и машин для механической переработки отходов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2025. – №S4-1. – С. 147-153. – DOI: 10.52261/02346206_2025_4C1_147.

3. Севостьянов М.В., Шеин Н.Т., Севостьянов В.С., Оболонский В.В., Проценко А.М., Горягин П.Ю., Бабуков В.А. Разработка и исследования оборудования для комплексной переработки техногенных полимерсодержащих материалов // СТИН. – 2025. – №9. – С. 21-25.
4. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия, 1977. – 368 с.
5. Кафаров В.В. Дорохов И.Н., Арутюков С.Ю. Системный анализ процессов химической технологии: измельчение и смешение / 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2018. – 440 с.
6. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
7. Ничипоренко С.П. Основные вопросы теории процессов обработки и формирования керамических масс. – Киев: Изд-во Академии наук УССР, 1960. – 112 с.

Сведения об авторах:

Гаевой Андрей Петрович – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Технологии и оборудование в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта»;

Севостьянов Владимир Семенович – д.т.н., профессор, кафедры «Транспортных и технологических систем»;

Проценко Анастасия Максимовна – аспирант, ассистент кафедры «Транспортных и технологических систем».