

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТВЕРДОФАЗНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ПОЛИМЕРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Д.Е. Кобзев, Г.С. Баронин, В.М. Червяков

*Кафедра «Теория машин, механизмов и детали машин»,  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; tmm-dm@mail.nnn.tstu.ru*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** диффузионные свойства; объемная штамповка; пластическое деформирование; полиэтилен высокой плотности; твердая фаза; твердофазная экструзия; ультразвуковое воздействие.

**Аннотация:** Представлены результаты применения ультразвукового воздействия на процесс твердофазной плунжерной экструзии и объемной штамповки полимерных материалов. Показано влияние ультразвука на технологические параметры процесса и на формируемые свойства обрабатываемых материалов. Приведены экспериментальные данные эксплуатационных и физико-механических свойств полимеров, доказывающих целесообразность использования твердофазной технологии с наложением ультразвуковых колебаний для получения изделий из полимеров с улучшенными эксплуатационными характеристиками для различных отраслей экономики.

---

Особенностью применения ультразвука является возможность переноса в материальных средах огромных энергий, направленных на развитие и совершенствование промышленных технологий. Перспективным направлением интенсификации технологических процессов является использование энергии механических колебаний ультразвуковой частоты высокой интенсивности.

В настоящее время опубликован ряд работ, указывающих на возможность и перспективы практического применения ультразвуковых методов для повышения качества полимерных материалов и интенсификации технологических процессов получения изделий [1, 2].

Рассматривается возможность повышения эксплуатационных характеристик готовых изделий из полимерных материалов и снижения необходимого давления формования с целью повышения экономической эффективности предлагаемого технологического процесса штамповки в твердом агрегатном состоянии в необогреваемой форме. Технологический процесс реализуется в условиях наложения дополнительных ультразвуковых колебаний в течение времени, необходимого для формования изделия, одновременно с воздействием давления формирующего инструмента на заготовку.

Моделирование процесса получения изделий методом твердофазной объемной штамповки реализовывалось на примере твердофазной экструзии полимеров в специальной ячейке высокого давления [3]. Данная ячейка является аналогом экструзионного пластометра, или капиллярного вискозиметра, предназначенного для определения показателя текучести расплава по ГОСТ 11645–73. С ее помощью определяются реологические характеристики обрабатываемого полимерного

материала и оптимальные технологические параметры процесса. При этом реализуется изотермическое сжатие полимерного образца в пресс-форме плунжерного типа с последующим выдавливанием в ячейке высокого давления типа капиллярного вискозиметра.

### Методика исследования

Заготовка полимера подвергается одностороннему осесимметричному сжатию при нулевой боковой деформации, что практически полностью моделирует процесс штамповки в твердой фазе при заполнении полимерным материалом полости пресс-формы. Для оценки объемного напряженного состояния полимерного материала в условиях, моделирующих реальные процессы обработки полимеров давлением, замеряется один из основных информативных параметров – критическое осевое давление  $P_{кр}$ , при котором полимерный материал переходит из упругого состояния в упругопластическое.

Для сравнения способов жидкофазной технологии переработки полимерных материалов, твердофазной обработки давлением в режиме твердофазной экструзии с дополнительным ультразвуковым воздействием и без него, проведен сравнительный анализ формируемых физико-механических и других эксплуатационных свойств полимеров по специальным и стандартным методикам: метод определения прочности на срез по ГОСТ 17302–71, метод испытания в условиях одноосного растяжения по ГОСТ 11262–80 (эксперименты проводились на испытательной машине УТС 101-5 при скорости перемещения подвижного зажима машины 50 мм/мин), метод определения уровня внутренних ориентационных напряжений [4].

Для оценки водопоглощения изделия использовали зональный метод, который относится к методам нестационарного режима, позволяющий решать как прямые, так и обратные задачи диффузии [5].

Экспериментальные данные по исследованию свойств полимерных материалов [6] позволяют определять оптимальную степень деформативности заготовки и прогнозировать поведение полимера в процессе производства изделий конкретной формы методом твердофазной технологии.

Известно, что при температурах размягчения полимера, определяемых структурно-механическими методами, в полимерных материалах резко возрастает структурная подвижность. До этих температур полимерные материалы обладают относительно жесткой матрицей, поэтому обработка материала давлением в твердой фазе без нагрева с применением ультразвукового воздействия обеспечивает структурную подвижность матрицы материала, облегчает процесс формования и снижает давление формования [7].

В момент течения материала через цилиндрическую фильеру происходят процессы как монолитизации, так и разрыхления в зонах дефектов материала (микротрещины, поры). Вследствие ультразвукового воздействия происходит затягивание и спайка этих дефектных областей, что приводит к монолитизации и повышению прочностных характеристик материала. При этом облегчается процесс пластического течения материала за счет вибрации матрицы и полимера, что приводит к снижению необходимого давления формования.

### Экспериментальные данные и их обсуждение

Объектами исследования являлись полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) ГОСТ 16338–85 и фторопласт-4 (Ф-4) ГОСТ 21000–81.

Результаты обработки полученных экспериментальных данных представлены в таблице, где приведены значения показателей свойств материалов, переработанных жидкофазной технологией (ЖФТ) через стадию расплава, обработанных давлением в режиме твердофазной экструзии (ТФЭ) и прошедших твердофазную экструзию с наложением ультразвукового воздействия (ТФЭ + УЗ).

**Технологические и эксплуатационные свойства  
исследуемых материалов**

Показатель	Фторопласт-4				ПЭВП			
	ГОСТ	ЖФТ	ТФЭ	ТФЭ + УЗ	ГОСТ	ЖФТ	ТФЭ	ТФЭ + УЗ
Давление формования $P_f$ , МПа	–	–	130	80	–	–	152	90
Разрушающее напряжение при растяжении $\sigma_p$ , МПа	14–35	20	23	24,8	24	25	28,3	31
Модуль упругости при растяжении $E_p$ , МПа	410	400	500	610	–	5	6,2	10,2
Разрушающее напряжение при срезе $\sigma_{ср}$ , МПа	–	18	20,5	20,9	–	21	34	43
Водопоглощение за 24 ч $W_{24}$ , %	–	–	–	–	–	0,18	0,1	0,07
Уровень внутренних напряжений $\sigma_{ост}$ , МПа	–	–	1,2	1	–	–	1,2	0,8

Примечание: условия ТФЭ:  $\lambda_{экс} = 2,07$ ,  $T_{экс} = 295$  К.

Анализ технологических параметров формования и физико-механических характеристик формируемых свойств материалов, в частности ПЭВП, выявил следующие результаты дополнительной твердофазной обработки с ультразвуковым воздействием в сравнении с материалом, полученным жидкофазной технологией:

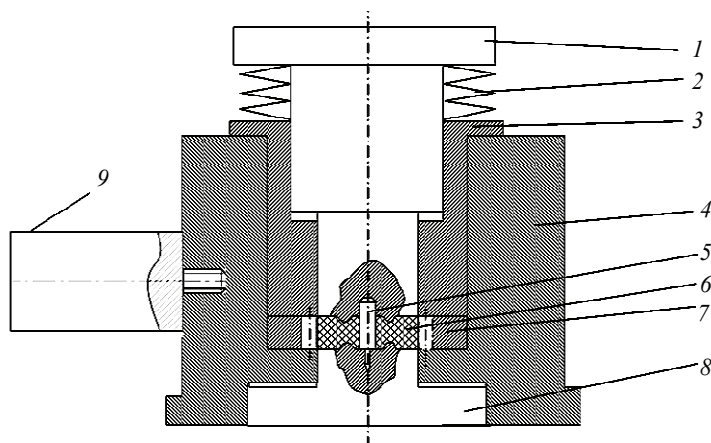
- необходимое давление формования при применении УЗ-воздействия уменьшается на 40 %;
- прочность в условиях срезающих напряжений увеличивается в 2 раза;
- прочность при растяжении увеличивается на 24 %;
- модуль упругости при растяжении увеличивается в 2 раза;
- снижается уровень внутренних остаточных напряжений на 33 %.

Дополнительно снижается максимальное влагопоглощение в 2,5 раза, что существенно повышает размерную точность изделий и улучшает качество их поверхности.

У фторопласта-4 наблюдаются качественно схожие улучшения перечисленных показателей.

Практическое использование данного метода объемной штамповки с применением ультразвукового воздействия можно проиллюстрировать на примере получения изделия «колесо зубчатое» (рисунок). Исходный полимерный материал – ПЭВП ГОСТ 16338–85. Заготовки из полимерного материала в форме цилиндров получены методом литья под давлением при температуре расплава 458–463 К.

Отработку технологических режимов объемной штамповки изделий с применением ультразвукового воздействия с частотой 20 кГц и плотностью потока 10 Вт/см<sup>2</sup> проводили в пресс-форме. Как показали результаты исследований,



**Пресс-форма для штамповки зубчатых колес из термопластов в твердом состоянии с применением ультразвукового воздействия:**

1 – пуансон верхний; 2 – пружина тарельчатая; 3 – стакан; 4 – обойма; 5 – знак; 6 – изделие; 7 – матрица; 8 – пуансон нижний; 9 – ультразвуковой излучатель

развитие пластической деформации полимера в процессе объемной штамповки зубчатых колес с дополнительным ультразвуковым воздействием сопровождается значительными ориентационными эффектами и оказывает существенное влияние на нагрузочную способность и износостойкость готового изделия, одновременно существенно улучшалось качество поверхности изделий и снижался процент брака.

### Выводы

Проведенное исследование твердофазной технологии объемной штамповки полимеров с дополнительным воздействием ультразвуковых колебаний доказало ее эффективность по сравнению с традиционной технологией. В результате ультразвукового воздействия снижается необходимое давление твердофазного формования примерно на 40 %, прочность полимера в условиях срезающих напряжений увеличивается в 2 раза, снижается уровень остаточных напряжений на 33 % и максимальное влагопоглощение в 2,5 раза.

Полученные результаты позволяют рекомендовать твердофазную технологию с ультразвуковым воздействием для получения изделий из полимеров с улучшенными эксплуатационными характеристиками для различных отраслей экономики.

*Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (ГК П219 от 23 апреля 2010 г.) проекта № 2.2.1.1.5207 «Научно-методическое обеспечение развития инновационного потенциала интегрированного научно-образовательного центра в области новых твердофазных химических технологий (НОЦ ТамбГТУ – ИСМАН «Твердофазные технологии»)» аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 гг.)».*

### Список литературы

1. Влияние ультразвука на основные параметры экструзии расплавов полимеров / А.А. Панов [и др.] // Энцикл. инженера-химика. – 2010. – № 6. – С. 11–17.
2. Шахов, С.А. Применение ультразвука для интенсификации процессов формования / С.А. Шахов // Изв. вузов. Строительство. – 2007. – № 5. – С. 111–118.

3. Кобзев, Д.Е. Твердофазная плунжерная экструзия полимерных композиций с применением ультразвука / Д.Е. Кобзев, Г.С. Баронин, В.Л. Полуэктов // Перспектив. мат. Функцион. наноматериалы и высокочистые вещества. Спец. вып. – 2011. – № 1. – С. 449–454.

4. Переработка полимеров в твердой фазе. Физико-химические основы / Г.С. Баронин [и др.]. – М. : Машиностроение-1, 2002. – С. 178–180.

5. Рудобашта, С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П. Рудобашта. – М. : Химия, 1980. – 248 с.

6. Кобзев, Д.Е. Исследование влияния ультразвука на процесс твердофазной экструзии полимерных композиций и свойства получаемых экструдатов / Д.Е. Кобзев, Д.О. Завражин, Г.С. Баронин // Тез. 6-й Всерос. конф. шк.-семинара по структур. макрокинетики для молод. ученых, Черноголовка, 26–28 нояб. 2008 г. / Ин-т структур. макрокинетики. – Черноголовка, 2008. – С. 28–29.

7. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, [и др.]. – Бийск : Изд-во Алтай. гос. ун-та, 2010. – 203 с.

---

## Improving the Efficiency of Solid Polymers Die Forging by Ultrasonic Treatment

D.E. Kobzev, G.S. Baronin, V.M. Chervyakov

*Department "Theory of Machines and Machine Parts", TSTU;  
tmm-dm@mail.nnn.tstu.ru*

**Key words and phrases:** diffusion properties; forging; high-density polyethylene; plastic deformation; solid phase; solid-state extrusion; ultrasonic treatment.

**Abstract:** The paper presents the results of ultrasonic influence on the process of solid-state ram extrusion and forging of polymeric materials. The effect of ultrasound on the technological process parameters and generated properties of the processed materials is shown. The experimental data of operational and physical-mechanical properties of polymers, proving the feasibility of using solid state technology with superimposed ultrasonic vibrations to obtain products made of polymers with improved performance for various industries are given.

---

## Erhöhung der Effektivität des hartphasischen Gesenkschmiedens der Polymere durch die Ultraschalleinwirkung

**Zusammenfassung:** Es sind die Ergebnisse der Anwendung der Ultraschalleinwirkung auf das Prozess des hartphasischen Plungerextrudierens und des Gesenkschmiedens der Polymerstoffe dargelegt. Es ist die Einwirkung des Ultraschalles auf die technologischen Parameter des Prozesses und auf die formierenden Eigenschaften der bearbeitenden Stoffe gezeigt. Es sind die experimentellen Angaben der physikalisch-mechanischen Betriebseigenschaften der Polymere angeführt, was die Zweckmäßigkeit der Benutzung der Hartphasentechnologie mit dem Auflegen der Ultraschallschwingungen für die Erhaltung der Erzeugnisse aus den Polymeren mit den verbesserten Exploitationscharakteristiken für die verschiedenen Wirtschaftszweige beweist.

## **Augmentation de l'efficacité de l'estampage volumineux de phase solide des polymères**

**Résumé:** Sont présentés les résultats de l'application de l'action ultra-son sur le processus de l'extrusion de piston de phase solide et de l'estampage volumineux des polymères. Est montrée l'influence de l'ultra-son sur les paramètres technologiques du processus et sur les propriétés formées des matériaux traités. Sont citées les données expérimentales des propriétés d'exploitations et celles physiques et mathématiques des polymères prouvant la justification de l'emploi de la technologie de phase solide avec l'application des oscillations ultra-son pour l'obtention des produits à partir des polymères avec les caractéristiques améliorées pour de différentes branches de l'économie.

---

**Авторы:** *Кобзев Дмитрий Евгеньевич* – аспирант кафедры «Теория машин, механизмов и детали машин», младший научный сотрудник НИСа; *Баронин Геннадий Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Теория машин, механизмов и детали машин»; *Червяков Виктор Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теория машин, механизмов и детали машин», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная геометрия и компьютерная графика», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---