

## ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ЭКСТРУЗИИ ДЛИННОМЕРНЫХ ПРОФИЛЬНЫХ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК С ЗАДАНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА

М. В. Соколов<sup>1✉</sup>, П. С. Беляев<sup>2</sup>, Д. В. Туляков<sup>3</sup>, К. В. Брянкин<sup>4</sup>

*Кафедры: «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (1),  
msok68@mail.ru; «Материалы и технология» (2), «Химия и химические технологии» (4),  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;*

*ТОГАПОУ «Тамбовский бизнес-колледж» (3), Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** длинномерные профильные заготовки; показатели качества профильных изделий; резинотехнические изделия; ультразвуковой волновод; экструзионная формующая головка.

**Аннотация:** В целях улучшения и прогнозирования показателей качества длинномерных профильных резинотехнических заготовок проведены экспериментальные исследования по оценке эффективности применения ультразвукового воздействия с помощью волновода, установленного перпендикулярно (радиально) к потоку экструдированной резиновой смеси на выходе из материального цилиндра перед формующей головкой, что также способствует разработке новых способов в технологическом процессе вторичной переработки полимерных материалов, в том числе резиновой крошки.

---

### Введение

Эффективность ультразвукового воздействия на различные технологические процессы подтверждена многочисленными исследованиями и опытом более чем тридцатилетнего применения ультразвуковых технологий на ряде предприятий различных отраслей промышленности, позволившими установить следующее. Под воздействием вибрации перестраиваются и разрушаются структурные связи во многих аморфных материалах, например, в полимерах, находящихся в вязкотекучем состоянии. При этом ускоряются механическая релаксация (тиксотропное снижение вязкости и упругости) и механодеструкция (частичное уменьшение молекулярной массы) макромолекул. В результате облегчается, например, виброформование полимеров (сокращается время переработки, снижаются рабочее давление и расход энергии), повышается качество изделий. При наложении на стационарную деформацию сдвига низкочастотных колебаний возникает эффект так называемой реологической нелинейности – увеличивается скорость течения полимерного материала (например, при вибропрессовании порошков и т.д.) [1, 2].

Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности обеспечивает 10 – 1000-кратное ускорение процессов, протекающих между двумя или несколькими неоднородными средами (растворения, очистки, обезжиривания, дегазации, крашения, измельчения, пропитки, эмульгирования, экстрагирования, кристаллизации, полимеризации, предотвращения образования накипи, гомогенизации, эрозии, химических и электрохимических реакций и др.).

Использование ультразвуковых колебаний позволяет осуществлять технологические процессы, не реализуемые или сложно реализуемые традиционными методами – обеспечивать размерную обработку (сверление, снятие фасок, выпол-

нение пазов) хрупких и твердых материалов, таких как керамика, полупроводниковые материалы, стекло, самоцветы, ферриты, сверхтвердые сплавы и стали.

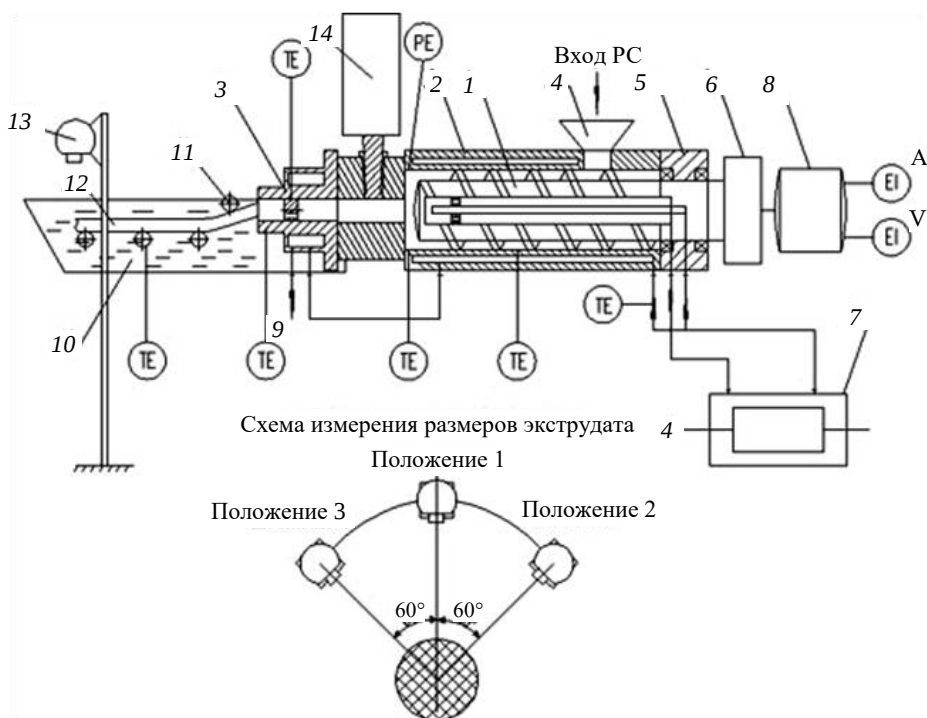
Ультразвуковые колебания позволяют интенсифицировать многие процессы, происходящие на границе контакта материалов (сварку полимерных материалов, склеивание), ускоряя технологические процессы и повышая качество получаемых изделий, а также разрабатывать новые технологические процессы и способы для вторичной переработки полимерных материалов, в том числе резиновой крошки [3].

### Исследование эффективности применения ультразвука при экструзии профильных резинотехнических заготовок

В качестве объекта исследования принят неизотермический процесс экструзии резиновой смеси (шифр 46ПРФ-26) на экспериментальной установке (рис. 1) [2].

Параметры резиновой смеси 46ПРФ-26 и технологический режим процесса экструзии: температура цилиндра и шнека  $T_{\text{ц}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; температура резиновой смеси на входе в винтовой канал  $T_{\text{см. вх}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Эксперимент проводился следующим образом. Резиновая смесь 46ПРФ-26, приготовленная в центральной заводской лаборатории АО «Тамбовмаш» (ОАО «АРТИ-Завод», Тамбов), с известными свойствами резалась на ленты шириной 20 мм и наматывалась на загрузочный барабан экспериментальной установки. Далее установка в течение 30 мин разогревалась (выход на режим) и проводилась серия экспериментов, которые заключались в получении образцов



**Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования процессов экструзии под влиянием ультразвука:**

1 – шнек; 2 – цилиндр; 3 – формующая головка; 4 – загрузочное устройство; 5 – опора шнека; 6 – редуктор; 7 – термостат; 8 – электродвигатель; 9 – дорнодержатель; 10 – ванна с теплоносителем; 11 – прижимные ролики; 12 – экструдат; 13 – цифровая фотокамера; 14 – ультразвуковой излучатель; ТЕ – датчики температуры; РЕ – датчик давления; А – амперметр; V – вольтметр

в течение 5, 10, 15 с фиксированной частотой вращения  $\omega = (5; 10; 20; 30)$  об/мин для каждого диаметра мундштука  $d = (8,4; 10,4; 18)$  мм. Также снимались следующие параметры:  $T_{\text{см. вых}}$  – температура выхода экструдата, которая измерялась игольчатой термопарой, вмонтированной в формующую головку, °С;  $P$  – давление, которое снималось с датчика часового типа, деление;  $I$  – потребляемый ток, измеряемый с помощью амперметра, А;  $Q$  – производительность шнековой машины, получаемая взвешиванием каждого полученного образца [г/30 с] и переводом в [кг/ч];  $\nu$  – частота ультразвуковой установки, Гц. На выходе из оформляющего канала проводили измерение диаметра в нескольких определенных местах, после охлаждения образцов измерения диаметров сечения экструдата проводились в тех же точках, что позволило рассчитать относительное изменение диаметра образца до и после охлаждения. После этого физико-механические показатели и размеры образцов, полученные с применением ультразвука, сравнивались с теми же показателями образцов без воздействия ультразвука.

В процессе экспериментов выбирались различные технологические режимы экструзии и конструкции выходных каналов формующего инструмента в целях уменьшения значения относительного изменения поперечного сечения экструдата (отношение разности диаметров экструдата и мундштука к диаметру мундштука) до возможно минимального. Также варьировались значения рабочих температур в экструдере при частоте ультразвуковой установки 21 756 Гц и времени воздействия 5, 10, 15 с. В результате экспериментальных исследований получены зависимости, представленные на рис. 2, 3.

Выбраны такие технологические параметры и аппаратное оформление, которые придают длинномерным резинотехническим заготовкам (РТЗ) требуемые физико-механические показатели [4]. Для улучшения показателей качества, то есть физико-механических характеристик длинномерных РТЗ, выбран способ воздействия на материал ультразвуковыми волнами, что привело к уменьшению разбухания длинномерных профильных заготовок из резиновой смеси на выходе из экструдера при сохранении деформационных характеристик на уровне допустимых значений для данного продукта и улучшило триботехнические характеристики материалов. Рост напряжений в полимерной композиции при малых деформациях реализуется при непродолжительном воздействии ультразвука на нее, что открывает новые возможности применения данного метода в практических целях.

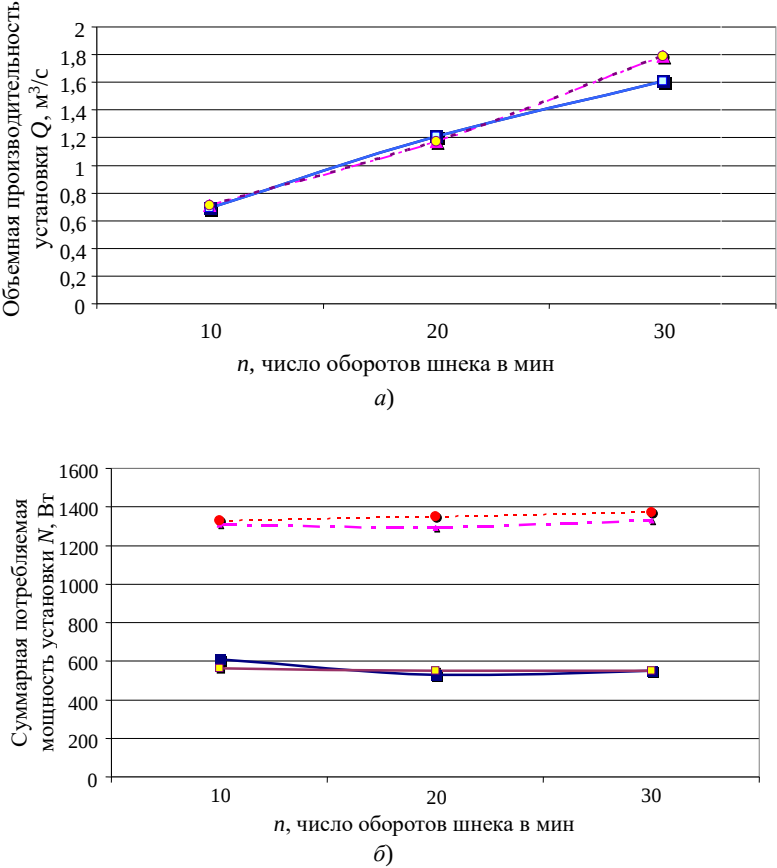
Методика экспериментальных исследований состоит в следующем. Необходимо определить такой режим экструзии и выбрать такую конструкцию формующего инструмента, чтобы в исследуемом материале «разбухание», то есть значение относительного изменения поперечного сечения экструдата (отношение разности диаметров экструдата и мундштука к диаметру мундштука), было минимальным. Для этого проведены предварительные эксперименты, которые заключались в том, чтобы выбрать несколько режимов работы экструдера (10, 20, 30 об/мин), затем исследования физико-механических характеристик без влияния ультразвука на резиновую смесь и после воздействия ультразвука. Опыты проводились на нескольких видах формующего инструмента (мундштуках). Результаты сравнивались со значениями, полученными без использования ультразвука.

Все данные экспериментальных исследований заносились в бланк исследований. Затем образцы экструдата исследовались в ЦЗЛ АО «Тамбовмаш» («АРТИ-Завод») для определения физико-механических показателей. Полученные данные по условной прочности при растяжении, пластичности, подвулканизации, вязкости по Муни, твердости образцов сравнивались с данными, полученными без влияния ультразвука при производстве заготовок. Физико-механические показатели остались на прежнем уровне.

Для определения оптимальных режимов переработки резиновой смеси с учетом изменения размеров экструдата получены следующие технологические зави-

симости от частоты вращения шнека: мощности  $N$ ; производительности  $Q$ ; давления  $P$ ; температуры выхода экструдата  $T_{\text{вых}}$ , а также зависимости относительного изменения диаметра экструдата до и после охлаждения  $\delta_{\text{на вых}}$ ,  $\delta_{\text{после охл}}$  от частоты вращения шнека и времени воздействия ультразвука, его частоты после процесса экструзии, и проведен сравнительный анализ их с эталоном (резиновая смесь до воздействия на нее ультразвуковых колебаний).

В результате проведенных экспериментов и анализа полученных данных построены графические зависимости от частоты вращения шнека при различных диаметрах мундштука  $d_m$  (см. рис. 2, 3). Производительность монотонно растет с увеличением частоты вращения шнека до 30 об/мин. (см. рис. 2, а). Минимальная потребляемая мощность под воздействием УЗ соответствует частоте вращения шнека 20 об/мин, а с увеличением частоты вращения до 30 об/мин мощность незначительно увеличивается. Расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями составляет менее 10 %. (см. рис. 2, б).



**Рис. 2. Зависимости производительности экструдера  $Q$  (а) и суммарной потребляемой мощности экструдера  $N$  (б) без и с воздействием ультразвуковых колебаний от частоты вращения шнека  $n$ :**

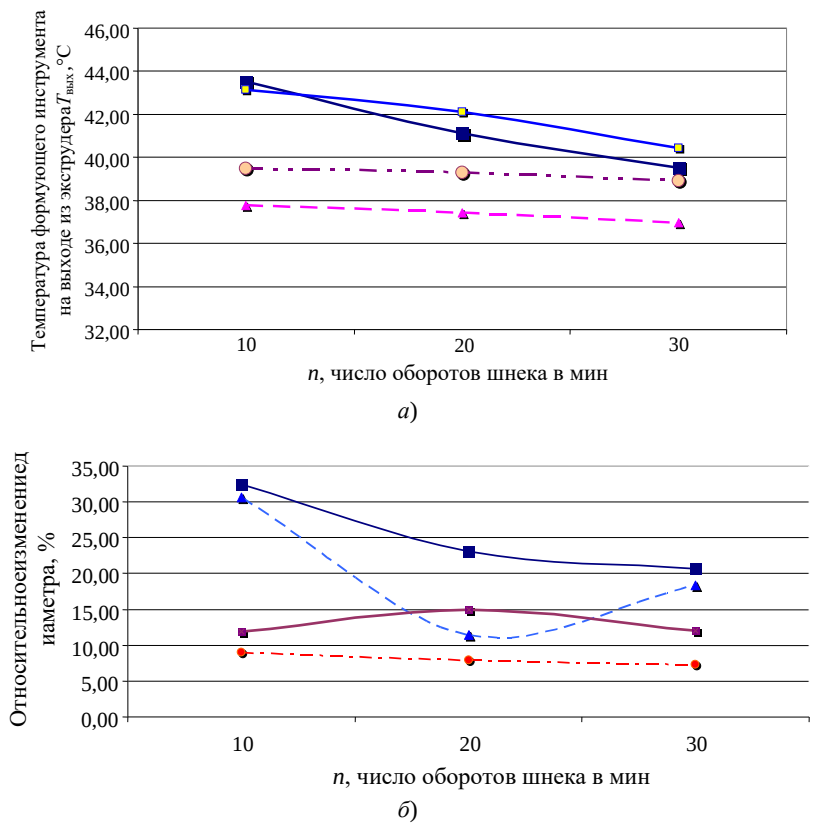
- без ультразвука при  $d_m = 10,4$  мм,  $l = 39$  мм;
- ▲- с применением ультразвука при  $d_m = 10,4$  мм,  $l = 39$  мм;
- без ультразвука при  $d_m = 18$  мм,  $l = 55$  мм;
- с применением ультразвука при  $d_m = 18$  мм,  $l = 55$  мм

С увеличением частоты вращения шнека происходит уменьшение  $T_{\text{вых}}$  на выходе из формующей головки. Это связано с уменьшением времени пребывания материала в перерабатывающих каналах (см. рис. 3, а).

Разбухание экструдата с ростом частоты вращения уменьшается в диапазоне 10...30 об/мин при отсутствии ультразвука и заметно уменьшается при наложении ультразвуковых колебаний на получаемый экструдат при числе оборотов до 20 об/мин, так как идет рост температуры от 50 °С при диаметрах мундштука 10,4 и 18 мм, следовательно, уменьшается вязкость, что приводит к уменьшению напряжений сдвига в диапазоне 20...30 об/мин (см. рис. 3, б).

Для выбора режима переработки прежде всего необходимо задаваться физико-механическими показателями. Расхождения с эталонными показателями (до воздействия ультразвука) составляют не более 10 %.

Исходя из вышеперечисленного для всех диаметров мундштука выбираем температуру цилиндра  $T_{\text{ц}} = 50\text{ °С}$ ; частоту вращения шнека 20 об/мин, так как при больших частотах вращения шнека суммарная потребляемая мощность увеличивается. При этом относительное изменение диаметра экструдата будет минимальным.



**Рис. 3. Зависимости температуры формующего инструмента на выходе из формующей головки  $T_{\text{вых}}$  (а) и относительного изменения диаметра  $\delta$  до и после его охлаждения (б) от частоты вращения шнека  $n$ :**

- без ультразвука при  $d_{\text{м}} = 10,4\text{ мм}$ ,  $l = 39\text{ мм}$ ;
- ▲— с применением ультразвука при  $d_{\text{м}} = 10,4\text{ мм}$ ,  $l = 39\text{ мм}$ ;
- без ультразвука при  $d_{\text{м}} = 18\text{ мм}$ ,  $l = 55\text{ мм}$ ;
- с применением ультразвука при  $d_{\text{м}} = 18\text{ мм}$ ,  $l = 55\text{ мм}$

## Заключение

Так как использование ультразвука при производстве длинномерных профильных резинотехнических заготовок приводит к резкому снижению относительного изменения диаметра экструдата, но при этом увеличивается расход суммарной потребляемой мощности экструдера с учетом ультразвуковой установки, значит требуется технико-экономическое обоснование эффективности его применения для достижения следующих результатов: прогнозируемых и заданных показателей качества РТИ4 проектирования энергосберегающего оборудования; разработки технологического процесса и способов вторичной переработки полимерных материалов, в том числе резиновой крошки.

### Список литературы

1. Басов, Н. И. Виброформование полимеров / Н. И. Басов, С. А. Любартович, В. А. Любартович. – Л. : Химия, 1979. – 160 с.
2. Методология расчета оборудования для производства длинномерных резинотехнических заготовок заданного качества / М. В. Соколов, А. С. Клинков, П. С. Беляев, В. К. Скуратов, В. Г. Однолько. – М. : Машиностроение, 2009. – 352 с.
3. Пат. 2 489 455 Российская Федерация, МПК C08J 11/00 (2006.01). Ультразвуковой девулканизатор непрерывного действия / М. М. Николюкин, А. С. Клинков, М. В. Соколов, П. С. Беляев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ» ; № 2011154732/05 ; заявл. 30.12.2011 ; опубл. 10.08.2013. Бюл. № 22.
4. Применение интегральных критериев качества при переработке полимерных материалов валково-шнековым методом / А. С. Клинков, М. В. Соколов, Д. Л. Полушкин, И. В. Шашков, П. С. Беляев, Д. В. Туляков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 870 – 881.

---

## Application of Ultrasound in Extrusion of Long Profile Rubber Billets with Specified Quality Parameters

M. V. Sokolov<sup>1</sup>✉, P. S. Belyaev<sup>2</sup>, D. V. Tulyakov<sup>3</sup>, K. V. Bryankin<sup>4</sup>

*Departments: “Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering” (1), msok68@mail.ru; “Materials and Technology” (2), “Chemistry and Chemical Technology” (4), TSTU, Tambov, Russia; Tambov Business College (3), Tambov, Russia*

**Keywords:** long profile billets; quality indicators of profile products; rubber products; ultrasonic waveguide; extrusion forming head.

**Abstract:** In order to improve and predict quality indexes of long profile rubber billets, experimental studies have been carried out to estimate the efficiency of ultrasonic influence using waveguide installed perpendicularly (radially) to the flow of extruded rubber mixture at the output of material cylinder before forming head, which also contributes to the development of new methods of polymer processing in the process of recycling polymeric materials, including crumb rubber.

### References

1. Basov N.I., Lyubartovich S.A., Lyubartovich V.A. *Vibroformovaniye polimerov* [Vibroforming of polymers], Leningrad: Khimiya, 1979, 160 p. (In Russ.)

2. Sokolov M.V., Klinkov A.S., Belyayev P.S., Skuratov V.K., Odnol'ko V.G. *Metodologiya rascheta oborudovaniya dlya proizvodstva dlinnomernykh rezinotekhnicheskikh zagotovok zadannogo kachestva* [Methodology for calculating equipment for the production of long rubber blanks of a given quality], Moscow: Mashinostroyeniye, 2009, 352 p. (In Russ.)

3. Nikolyukin M.M., Klinkov A.S., Sokolov M.V., Belyayev P.S. *Ul'trazvukovoy devulkanizator nepreryvnogo deystviya* [Continuous ultrasonic devulcanizer], Russian Federation, 2013, Pat. 2489455 (In Russ.)

4. Klinkov A.S., Sokolov M.V., Polushkin D.L., Shashkov I.V., Belyayev P.S., Tulyakov D.V. [Application of integral quality criteria in processing of polymeric materials by the roller-screw method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 870-881. (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Anwendung von Ultraschall bei der Extrusion von langdimensionalen Gummiprofilwerkstücken mit festgelegten Qualitätsparametern**

**Zusammenfassung:** Zur Verbesserung und Vorhersage der Qualität von langdimensionalen Profilgummi-Werkstücken sind experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um die Wirksamkeit der Ultraschallwirkung mit einem Wellenleiter zu bewerten, der senkrecht (radial) zum Strang der extrudierten Gummimischung am Ausgang des Materialzylinders vor dem Formkopf montiert ist, was auch zur Entwicklung neuer Verfahren im Prozess der Wiederverwertung von Polymermaterialien, einschließlich Gummikrümel, beiträgt.

---

### **Application des ultrasons dans l'extrusion de pièces en caoutchouc de profil long avec des indicateurs de qualité prédéfinis**

**Résumé:** Afin d'améliorer et de prédire les indicateurs de qualité des ébauches en caoutchouc à profil long, sont réalisées des études expérimentales sur l'évaluation de l'efficacité de l'application de l'effet ultrasonore au moyen d'un guide d'ondes monté perpendiculairement (radialement) au flux du mélange de caoutchouc extrudé à la sortie du cylindre de matériau devant la tête de dans le processus technologique de recyclage des matériaux polymères, y compris les miettes de caoutchouc.

---

**Авторы:** *Соколов Михаил Владимирович* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Беляев Павел Серафимович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Туляков Денис Валерьевич* – преподаватель ТОГАПОУ «Тамбовский бизнес-колледж», Тамбов, Россия; *Брянкин Константин Вячеславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химические технологии», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.