УДК 621.9.048.6:678

Повышение устойчивости ультразвуковой волноводной системы для прессования полимерных композиционных материалов

Д.А. Негров, В.Ю. Путинцев, Э.И. Хусаенова, Д.Д. Закирова, Ф.С. Жижин
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. В статье рассматривается создание ультразвукового инструмента с учетом влияния характера и величины технологической нагрузки, действующей на акустический узел в процессе прессования трех политетрафторэтиленовых композиций. Нагрузка выводит систему из резонансного режима, увеличивает потери энергии в акустической системе, резко уменьшает амплитуду колебательной скорости рабочего торца ультразвукового инструмента, что отрицательно сказывается на механических свойствах композита. В результате проведенной работы разработан комбинированный инструмент для ультразвукового прессования, который повышает в четыре раза частотную устойчивость волноводной системы, обеспечивает эффективную работу ультразвуковой установки в целом и увеличивает предел прочности синтезируемого композиционного материала на 10 %.

Ключевые слова: ультразвуковой инструмент, полимерный композиционный материал, политетрафторэтилен, показатель частотной устойчивости

Механические и триботехнические свойства политетрафторэтилена (ПТФЭ) позволяют применять его в узлах трения без смазки. В тоже время низкая износостойкость политетрафторэтилена требует разработки новых способов и методов повышения механических и триботехнических свойств, для работы при высоких удельных нагрузках и скоростях скольжения [4].

Достичь существенного повышения эксплуатационных свойств полимерных композиционных материалов можно созданием совершенствованных технологий получения этих материалов в направлении повышения уровня внешнего энергетического воздействия и активации компонентов непосредственно при синтезе полимерных композиционных материалов [3, 5].

Одним из способов внешнего энергетического воздействия на полимерные материалы является введение энергии ультразвуковых колебаний непосредственно при прессовании изделия [1–6], в результате чего в полимерах наблюдается целый ряд физических и химических явлений, приводящих к интенсификации процессов переработки, снижению энергоемкости оборудования, повышению качества готовых изделий.

Интенсификация процесса прессования полимерных композиционных материалов (ПКМ) энергией ультразвука сдерживается низкой эффективностью ультразвуковых передающих устройств (волноводов). Процесс прессования порошков сопряжен с большой технологической нагрузкой на ультразвуковую волноводную систему. Нагрузка вызывает смещение частоты колебаний волноводной системы, что выводит систему из резонансного режима, увеличивает

потери энергии в акустической системе, резко уменьшает амплитуду колебательной скорости рабочего торца ультразвукового инструмента.

Это обстоятельство обуславливает необходимость учитывать характер и величину рабочей нагрузки при расчете параметров волноводной системы. Созданный в результате такого расчета ультразвуковой инструмент позволит существенно интенсифицировать процесс прессования ПКМ.

В соответствии с этим целью данной работы является создание ультразвукового инструмента с учетом влияния характера и величины технологической нагрузки, действующей на акустический узел в процессе прессования трех политетрафторэтиленовых композиций, модифицированных: 8% – скрытокристаллического графита (Ф4СКГ8), 6% – углеродного волокна (Ф4УВ6) и 8% – скрытокристаллического графита, 6% – углеродного волокна и 2% – MoS_2 (Ф4СКГ8 УВ6М2).

Анализ работы волноводной системы показывает, что для повышения эффективности процесса ультразвукового прессования необходимо выполнение следующих требований:

1) ультразвуковой инструмент должен обеспечивать требуемую амплитуду колебаний при заданной выходной площади инструмента;

2) динамические напряжения не должны превышать предела выносливости материала системы;

3) при изменении в процессе ультразвукового прессования действующей на нее технологической нагрузки, ультразвуковая система должна работать в режиме устойчивого резонанса.

При проектировании волноводной системы заданная выходная площадь инструмента (определяемая размерами прессуемого изделия) накладывает ограничения по коэффициенту усиления K_y:

$$\mathrm{K_y} = \mathrm{A_{вх}}/\mathrm{A_{вых}}\ , \qquad (1)$$

где $A_{вх}$ и $A_{вых}$ – входная и выходная амплитуда колебаний волновода. Необходимо учитывать, что чем больше коэффициент усиления тем больше динамические напряжения, возникающие в волноводе, выше потери энергии в волноводной системе, и ниже устойчивость акустической системы к нагрузке. Таким образом, амплитуда на рабочем торце прессового инструмента должна быть достаточной для выполнения процесса прессования.

Соответствие рассчитываемой волноводной системы второму пункту требований может быть оценено как:

$$\sigma_{\max} \le [\sigma^{-1}]\ , \qquad (2)$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальное напряжение в волноводе.

Условие, сформулированное в третьем пункте, можно оценить устойчивостью собственной частоты колебаний системы к изменению нагрузки. Показатель частотной устойчивости определяется из выражения [5]:

$$\Omega = \Delta\Psi\left(\frac{\Delta f}{f}\right)^{-1}\ , \qquad (3)$$

где $\Delta\Psi$ – изменение технологической нагрузки, приводящее к рассогласованию системы; Δf – изменение резонансной частоты системы под действием технологической нагрузки.

Очевидно, что чем больше показатель частотной устойчивости (Ω), тем более целесообразно применение волноводной системы в технологических процессах с немонотонной нагрузкой.

Ультразвуковой волновод-инструмент представляет собой резонансный полуволновой стержень (рис. 1) или совокупность стержней с заданным законом изменения площади поперечного сечения по его оси, совершающий продольные колебания.

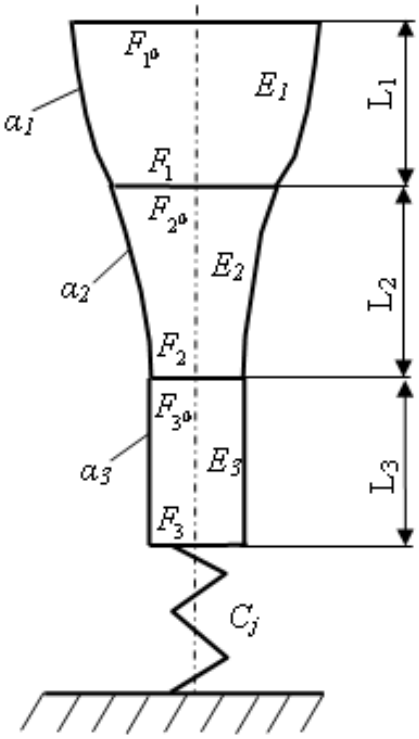

Рисунок 1 – Ультразвуковой инструмент

По разные стороны от узловой плоскости колебаний волновода находятся различные по массе участки стержня. Поскольку усилия, действующие сверху и снизу от узловой плоскости колебаний, взаимно компенсируют друг друга, амплитуда колебаний торца меньшей площади больше, т.е. коэффициент устойчивости тем больше, чем больше масса выходного участка стержня.

Расчет такой волноводной системы есть комплексная задача, решаемая относительно двух противоположных вариантов: максимальной частотной устойчивости при заданном коэффициенте усиления и максимального коэффициента усиления при заданной частотной устойчивости.

В процессе прессования изделий из ПКМ амплитуда выходных колебаний, которая непосредственно зависит от коэффициента усиления волновода, определяется технологическими задачами, а ее падение под действием нагрузки, вследствие недостаточной частотной устойчивости, резко снижает эффективность работы всей волноводной системы. Поэтому первый вариант является более предпочтительным. Он может быть реализован при оптимизации геомет-

рии волноводных систем из условия обеспечения максимальной частотной устойчивости при амплитуде необходимой для прессования.

Показатель устойчивости собственной частоты колебаний к изменению нагрузки определяли по формуле:

$$\Omega = \left\{ \frac{\left[\frac{(EF)_{i-1}}{E_i F_i} \Delta\Psi_{i-1} + \alpha_i \right] \left[\left(\frac{\alpha_i}{\beta_i} tg\beta_i L_i + 1 \right) - \left(\alpha_i - \beta_i tg\beta_i L_i \right) \right]}{1 - \frac{l}{\beta_i} \left[\frac{E_{i-1} F_{i-1}}{E_i F_i} \Psi_{i-1} + \alpha_i \right] tg\beta_i \lambda_i} \right\} \frac{f}{\Delta f} \quad , \qquad (4)$$

где $\lambda_i = 2\pi f/c$, $\beta_i = \sqrt{1 - \frac{\alpha^2}{\lambda^2}}$, E – модуль Юнга, F – площадь поперечного сечения волновода, α – показатель экспоненты, L – длина участка, i – номер участка.

Оценка показателя частотной устойчивости проводилась по изменению механических свойств, в получаемых ПКМ, в зависимости от параметров режима прессования. Исследования проводились на трех видах ультразвуковых инструментах: комбинированном, экспоненциальном и ступенчатом.

Частота смещения Δf определялась экспериментально на ультразвуковой установке (см. рис. 1), при изменении частоты колебаний акустической системы в диапазоне 16,8 – 18,8 кГц. Амплитуда колебаний ультразвукового инструмента (А) и время прессования (t) были фиксированными (А=14 мкм, t=90 с). Кроме того, ультразвуковое прессование порошковых композиционных материалов проводилось при различных давлениях (Р), в приделах 43–87 МПа. Механические свойства образцов при растяжении определялись на разрывной машине Р 0,5 со скоростью деформации 20 мм/мин по ГОСТ 11262–80. После ультразвукового прессования образцы подвергались термообработке (спеканию) при температуре 360 ^{o}С.

Полученные зависимости предела прочности от частоты колебания ультразвукового инструмента (волновода) для исследуемых ПКМ приведены на рисунках 2 – 4.

Из полученных результатов следует, что влияние технологической нагрузки в процессе ультразвукового прессования вызывает существенное изменение резонансной частоты колебаний акустической системы (Δf =400 Гц), а наиболее оптимальное давление ультразвукового прессования составляет 65 МПа. С увеличением давления прессования свыше оптимальной величины предел прочности при растяжении уменьшается на 10 % . Это связано с тем, что при повышении давления прессования возрастает нагрузка, действующая на акустический узел, что в свою очередь вызывает уменьшение амплитуды колебаний волновода в процессе ультразвукового прессования.

Определенная из экспериментов величина изменения резонансной частоты колебаний акустического узла подставлялась в формулу (4), по которой рассчитывались показатели частотной устойчивости ультразвуковых инструментов различной формы.

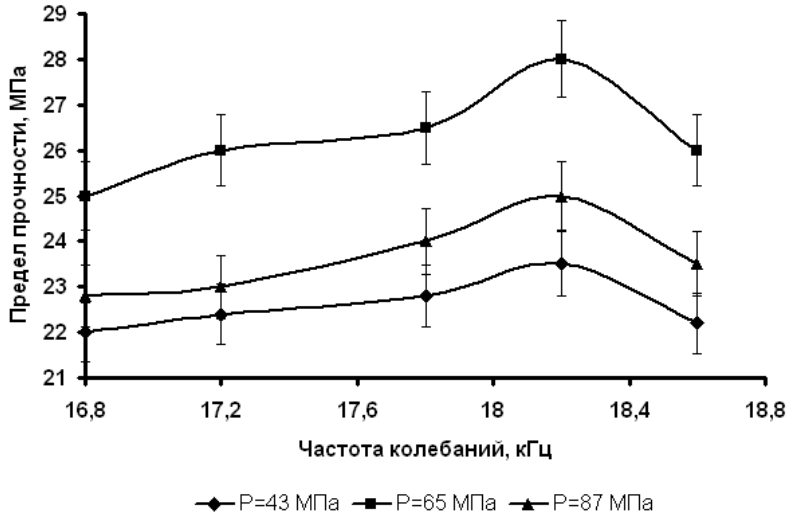

Рисунок 2 – Зависимость предела прочности от частоты колебания волновода при ультразвуковом прессовании ПКМ Ф4СКГ8 УВ6М2

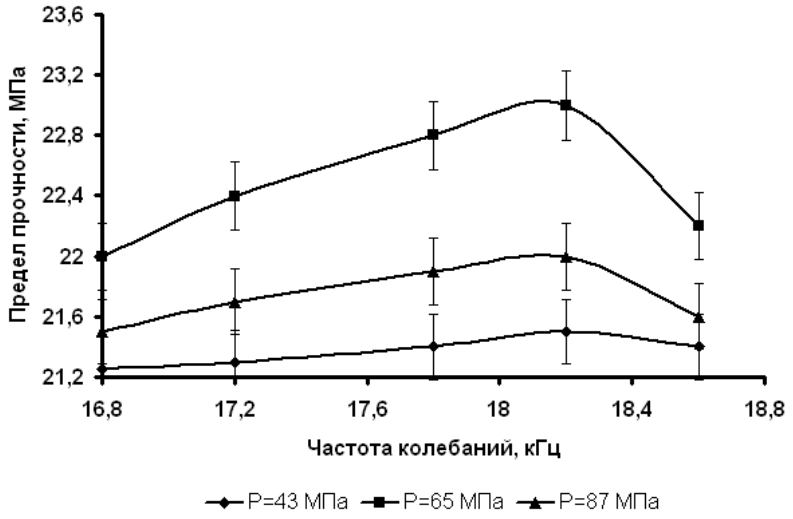

Рисунок 3 – Зависимость предела прочности от частоты колебания волновода при ультразвуковом прессовании ПКМ Ф4СКГ8

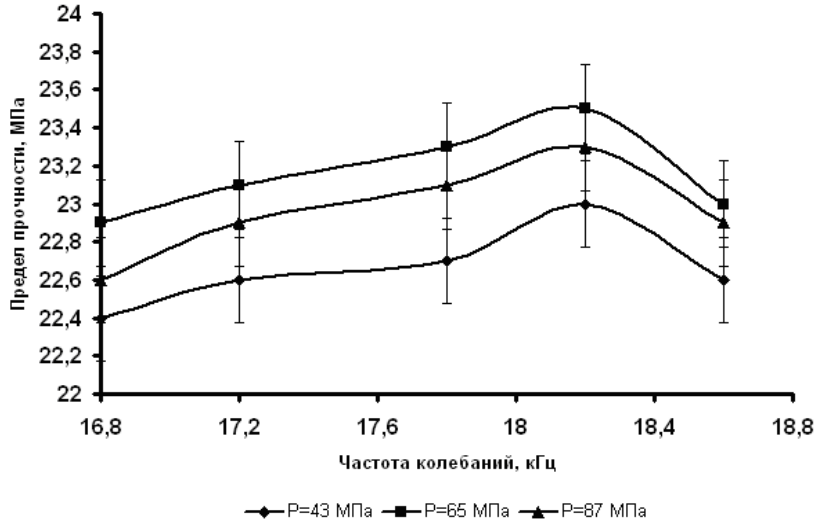

Рисунок 4 – Зависимость предела прочности от частоты колебания волновода при ультразвуковом прессовании ПКМ Ф4УВ6

На рис. 5 приведены расчетные зависимости показателя частотной устойчивости от коэффициента усиления для комбинированного, экспоненциального и ступенчатого волноводов. Видно, что показатель частотной устойчивости комбинированного волновода с заданным коэффициентом усиления более чем в четыре раза превышает устойчивость экспоненциального и ступенчатого волновода, с тем же коэффициентом усиления.

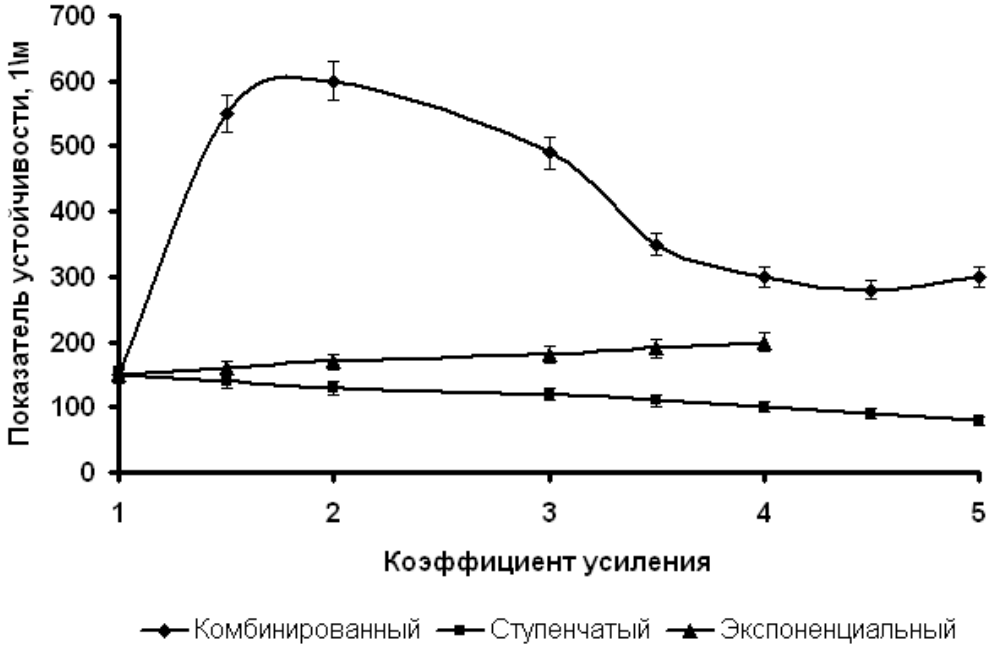

Рисунок 5 – Зависимость показателя частотной устойчивости от коэффициента усиления

Результаты выполненной работы позволили создать комбинированный ультразвуковой инструмент, для прессования изделий из полимерных композиционных материалов, который повышает в четыре раза частотную устойчивость волноводной системы, обеспечивает эффективную и устойчивую работу ультразвуковой установки в целом.

Библиографический список

1. Negrov, D. A. Development of Polymer Composites Based on Polytetrafluoroethylene and Detonation Nanodiamonds / D. A. Negrov, E. N. Eremin, I. V. Mozgovoi // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Vol. 52, № 9-10. – P. 627–629. – DOI: 10.1007/s10556-017-0243-8.

2. Negrov, D. A. The influence of ultrasonic exposure on polytetrafluoroethylene structure modified with boron nitride / D. A. Negrov, E. N. Eremin // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 858 : Mechanical Science and Technology Update. – P. 012021. – Doi :10.1088/1742-6596/858/1/012021.

3. Negrov, D. A. The use of ultrasonic exposure for the modification of synthesized composite materials / D. A. Negrov, E. N. Eremin, V. V. Kuznetsov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 168. – P. 012018. – Doi:10.1088/1757-899X/168/1/012018.

4. Негров, Д. А. Влияние ультразвукового воздействия на механические свойства политетрафторэтилена, модифицированного нитридом бора/ Д.

А. Негров, Е. Н. Еремин, В. Ю.Путинцев [и др.] // Омский научный вестник. – 2014. – № 1 (127). – С. 110-113.

5. Негров, Д. А. Влияние ультразвукового воздействия на механические свойства политетрафторэтилена, модифицированного нитридом бора/ Д. А. Негров, Е. Н. Еремин, В. Ю.Путинцев [и др.] // Омский научный вестник. – 2014. – № 1 (127). – С. 110-113.

6. Пат. 2218886 Российская Федерация, МПК: 7А 61В 17/56 А, 7А 61N 7/00 В. Способ эндопротезирования крупных суставов [Текст] / Новиков А.А., Шустер Я.Б., Негров Д.А. [и др.]; заявитель и патентообладатель Новиков А.А., Шустер Я.Б., Негров Д.А. [и др.]. – № 2001133132/14; заявл. 06.12.200118; опубл. 20.12.2003, Бюл. №35.