

Научная статья

УДК 620.22

doi: 10.55196/2411-3492-2023-1-39-117-123

Исследование прочности конструкционных материалов деталей сельскохозяйственных машин

Заира Муссавна Жирикова^{✉1}, Владимир Закиевич Алоев²

Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, проспект
Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030

^{✉1}zaira.dumaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5545>

²aloev56@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5080-4133>

Аннотация. Статья посвящена актуальной на сегодняшний день проблеме создания высокопрочных композитных материалов для применения их в узлах и деталях технических средств агропромышленного назначения. Эффективным способом решения этой проблемы является создание в полимерном материале ориентированной структуры и усиление его дисперсными наполнителями. Целью настоящей работы является исследование прочности ориентированных полимерных композитов в рамках современных физических концепций. Эта цель реализуется на примере ориентированного полимерного композита на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, полученного твердофазной экструзией. В качестве наполнителя использованы дисперсные частицы алюминия и боксита. Для создания ориентированной структуры в полимерном композите в работе использована плунжерная экструзия, основанная на совмещении процесса монолитизации и ориентационной вытяжки. Рассмотрена возможность описания прочности ориентированных дисперсно наполненных полимерных композитов в рамках существующих теоретических представлений, учитывающих возможности передачи напряжения через межфазные границы. Установлено, что степень адгезии играет в этом процессе действующую двойственную роль: ее ослабление повышает степень молекулярной вытяжки, что положительно сказывается на межфазной прочности и одновременно увеличивает относительную долю микронесплошности. Обнаружено, что интегральным следствием ослабления межфазной адгезии является снижение прочности композита.

Ключевые слова: композиты, предел прочности, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, степень вытяжки, межфазная прочность, уравнение Лейднера-Вудхемса, микронесплошность

Для цитирования. Жирикова З. М., Алоев В. З. Исследование прочности конструкционных материалов деталей сельскохозяйственных машин // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2023. № 1(39). С. 117–123.

doi: 10.55196/2411-3492-2023-1-39-117-123

Original article

Study of the strength of structural materials of agricultural machinery parts

Zaira M. Zhirikova^{✉1}, Vladimir Z. Aloev²

Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue, Nalchik,
Russia, 360030

^{✉1}zaira.dumaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5545>

²aloev56@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5080-4133>

Abstract. The article is devoted to the current problem of creating high-strength composite materials for their use in nodes and parts of agro-industrial equipment. An effective way to solve this problem is to create an oriented structure in the polymer material and strengthen it with dispersed fillers. The purpose of this work is to study the strength of oriented polymer composites within the framework of modern physical concepts. This purpose is realized on the example of an oriented polymer composite based on ultra-high molecular weight polyethylene obtained by solid-phase extrusion. Dispersed particles of aluminum and bauxite were used as a filler. To create an oriented structure in a polymer composite, plunger extrusion has been used in the work, based on the combination of the monolithization process and orientation extraction. The possibility of describing the strength of oriented dispersion-filled polymer composites within the framework of existing theoretical concepts, taking into account the possibilities of voltage transmission through interphase boundaries, is considered. It has been established that the degree of adhesion plays a dual role in this process; its weakening increases the degree of molecular extraction, which has a positive effect on the interfacial strength and at the same time increases the relative proportion of the microplasticity. It is found that the integral consequence of the weakening of the interfacial adhesion is a decrease in the strength of the composite.

Keywords: composites, ultimate strength, ultrahigh molecular weight polyethylene, degree of extraction, interfacial strength, Leidner-Woodhams equation, microplasticity

For citation. Zhirikova Z.M., Alov V.Z. Study of the strength of structural materials of agricultural machinery parts. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2023; 1(39):117–123. (In Russ.). doi: 10.55196/2411-3492-2023-1-39-117-123

Введение. Одним из важных эксплуатационных характеристик полимерных конструкционных материалов является предел прочности, определяющий их применение в узлах и деталях технических средств агропромышленного назначения. Эффективным способом получения высокопрочных полимерных материалов является создание в них ориентированной структуры и усиление его дисперсными наполнителями.

В настоящее время имеется ряд теорий, описывающих прочность (напряжение разрушения) дисперсно-наполненных полимерных композитов. Наиболее распространенным является представление напряжения разрушения в виде [1]:

$$\sigma_p = \sigma_p^M (1 - a\varphi_n^n), \quad (1)$$

где:

σ_p^M – прочность полимерной матрицы,

φ_n – объемное содержание наполнителя,

a и n – константы, зависящие от формы и построения частиц в модели композита.

Уравнение (1) не может быть использовано для описания прочности ориентированных полимеризационно-наполненных композитов, как минимум, по двум причинам. Во-первых, оно предсказывает $\sigma_p < \sigma_p^M$, тогда как для таких композитов данное усло-

вие не выполняется [2]. Во-вторых, указанное уравнение предполагает плохую адгезию на границе наполнитель – полимерная матрица и отсутствие на ней концентрации напряжений [1], в то время как полимеризационно-наполненные композиты имеют хорошую межфазную адгезию, по крайней мере, в недеформированном состоянии [3]. Поэтому для оценки прочности рассматриваемых объектов следует использовать представления, учитывающие возможность передачи напряжения через межфазные границы.

Цель исследования – изучение прочности полимеризационно-наполненных композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) в рамках существующих теорий с учетом отмеченных факторов.

Материалы, методы и объекты исследования. Исследовали полимеризационно-наполненные композиты СВМПЭ-А1 и СВМПЭ-боксит на основе СВМПЭ с молекулярной массой $\sim 10^6$. Размер частиц наполнителей составлял около 10 мкм, объемное содержание – 0,25. Образцы для испытаний получали методом твердофазной экструзии по той же схеме, что и в работе [2], при температуре 393°К. Степень экструзионной вытяжки λ изменяли за счет использования фильер различного диаметра и рассчитывали по формуле [2]:

$$\lambda = d_3^2 / d_\phi^2, \quad (2)$$

где:

d_3 и d_ϕ – соответственно диаметры заготовки и калибрующего пояса фильеры.

Деформационно-прочностные характеристики изучали методом трехточечного изгиба на образцах цилиндрической формы диаметром 4,5 мм и базовой длиной 30 мм. Испытания проводили при 293К и скорости перемещения зажимов испытательной машины 5 мм/мин, что соответствовало максимальной скорости деформации $2,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Термическую усадку измеряли на образцах цилиндрической формы диаметром 5-12 мм и длиной ~15 мм после нагрева с выдержкой при каждой температуре испытаний в течение 15 мин. Степень молекулярной вытяжки λ_m определяли из данных по термоусадке по формуле [4]:

$$\lambda_m = L / L_0, \quad (3)$$

где:

L и L_0 – соответственно длина заготовки после термоусадки и перед экструзией.

Результаты исследования. Поскольку у наполненных композитов процессы молекулярной ориентации происходят только в полимерной матрице, для них следует рассчитывать скорректированную величину молекулярной вытяжки [2]:

$$\lambda_m^K = \frac{\lambda_m}{1 - \phi_n}. \quad (4)$$

По указанным выше причинам для исследуемых композитов напряжение разрушения будет функцией прочности на сдвиг полимерной матрицы τ_m и прочности межфазной связи полимер-наполнитель σ_y , которую дает уравнение Лейднера-Вудхэмса [1]:

$$\sigma_p = (\sigma_a + 0,83\tau_m) + \sigma_a K(1 - \phi_n), \quad (5)$$

где:

K – коэффициент концентрации напряжения.

Недостатком уравнения (5) является трудность независимого экспериментального определения величины σ_a . Тем не менее, оно может быть использовано для оценки величины σ_a по известным значениям σ_p , которые можно легко получить экспериментально.

Для решения этой задачи сделаем два допущения. Поскольку для СВМПЭ и композитов на его основе при всех λ наблюдается макроскопическая текучесть с пределом текучести σ_T [2], то в качестве τ_m можно принять предел текучести на сдвиг τ_T полимерной матрицы, определяемый из соотношения [5]:

$$\tau_m = \tau_T = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}. \quad (6)$$

Величина K в уравнении (5) не зависит от размера частиц наполнителя [1] и в первом приближении ее можно считать постоянной. В данной работе принято $K=2$. Такая аппроксимация несколько повлияет на абсолютные значения σ_a , но не на тенденцию ее изменения при вариации любого параметра.

На рисунке 1 показано соотношение между σ_p и величиной $0,83\tau_T$ для композитов СВМПЭ-Al и СВМПЭ-боксит. Наблюдается линейная корреляция, которая согласуется с уравнением (5). Это является еще одним подтверждением применимости указанного уравнения для оценки σ_p (или σ_a) рассматриваемых композитов.

Так как одним из основных параметров, контролирующих свойства ориентированных полимеров, является степень молекулярной вытяжки [2, 4], построим зависимость σ_a (λ_m^K) для исследованных материалов (вставка на рис. 1). Поведение σ_a сходно с изменением модуля упругости E как функции λ_m^K этих же композитов [2, 6, 7]. Последнее связано с образованием микронесплошностей на межфазной границе полимер-наполнитель при достаточно больших λ . Можно предположить, что аналогичная причина вызывает и снижение σ_a .

Относительная доля микронесплошностей C_v легко рассчитывается из соотношения [8]:

$$\frac{E_k}{E_k^{\max}} = (1 - 2C_v), \quad (7)$$

где:

E_k и E_k^{\max} – соответственно модули упругости реального композита и такового, не имеющего микронесплошностей на межфазной границе (максимально достигаемое значение).

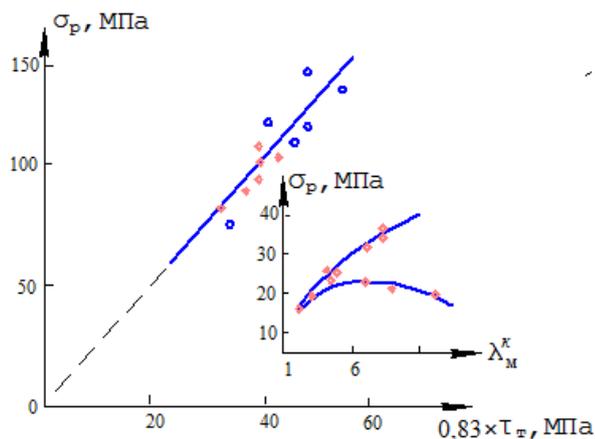


Рисунок 1. Соотношение между напряжением разрушения σ_p и параметром $0,83 \tau_T$ для композитов СВМПЭ-А1 (•) и СВМПЭ-боксит (◦).

На вставке – зависимости межфазной прочности σ_a от степени молекулярной вытяжки λ_m^K для композитов СВМПЭ- А1(•) и СВМПЭ-боксит (◦)

Figure 1. The ratio between the fracture stress σ_p and the parameter $0,83 t$ for UHMWPE-Al (•) and UHMWPE-bauxite (◦) composites.

The insert shows the dependences of the interfacial strength σ_a on the degree of molecular extraction λ_m^K for UHMWPE-Al (•) and UHMWPE-bauxite (◦) composites

Построенная нами зависимость σ_a от параметра $\lambda_m^K (1 - 2C_v)$ в предположении, что микронесплошности снижают величину σ_a в такой же степени, как и величину E_k , оказалась нелинейной. Это подтверждает известный факт [9], что наличие микронесплошностей в композитах снижает их прочность гораздо сильнее, чем модуль упругости. В то же время зависимость σ_a от $\lambda_m^K (1 - 2C_v)^2$ линейна, общая для обоих композитов и проходит через начало координат (рис. 2). Следовательно, на межфазную прочность в ориентированных композитах в основном влияют два параметра: степень молекулярной вытяжки, повышение которой приводит к росту σ_a , и относительная доля микронесплошностей на межфазных границах, с увеличением которой σ_a уменьшается. При этом влияние последней сильнее, чем λ_m^K (квадратичная зависимость от C_v).

Используя полученные данные, можно установить эмпирическую зависимость σ_a , от указанных параметров:

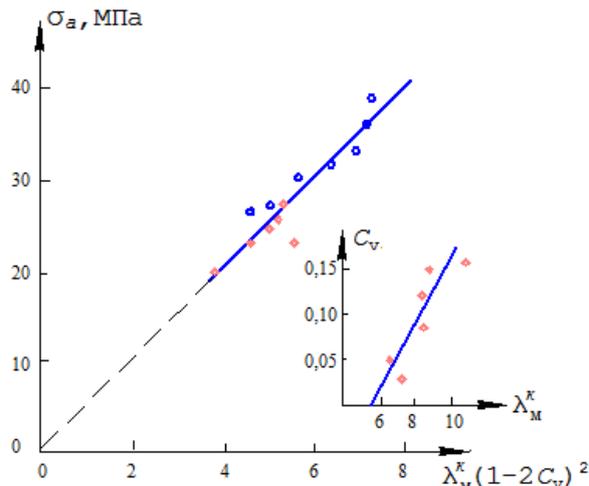


Рисунок 2. Зависимость межфазной прочности σ_a от параметра $\lambda_m^K (1 - 2C_v)^2$ для композитов СВМПЭ-А1 (•) и СВМПЭ-боксит (◦).

На вставке – зависимости относительной доли микронесплошностей C_v от степени молекулярной вытяжки λ_m^K для композитов СВМПЭ-А1 (•) и СВМПЭ-боксит (◦)

Figure 2. Dependence of the interfacial strength σ_a on parameter $\lambda_m^K (1 - 2C_v)^2$ for UHMWPE-Al (•) and UHMWPE-bauxite (◦) composites.

The insert shows the dependence of the relative fraction of micro-surfaces C_v on the degree of molecular extraction λ_m^K for UHMWPE-Al (•) and UHMWPE-bauxite (◦) composites

$$\sigma_a = 6,5 \left[\lambda_m^K (1 - 2C_v)^2 - 1 \right]. \quad (8)$$

На рисунке 3 выполнено сравнение экспериментальных и рассчитанных по уравнению (7) зависимостей $\sigma_a(\lambda)$ для композитов СВМПЭ-А1 и СВМПЭ-боксит. В целом наблюдается их хорошее соответствие. Необходимые для оценки σ_a параметры получены независимыми способами: λ_m^K – из данных по термоусадке, C_v – из результатов механических испытаний (уравнение (7)). По рассчитанным величинам σ_a и экспериментально установленным значениям σ_T можно найти σ_p экструдированных композитов, используя уравнения (5) и (6). Из рисунка 3 видно, что имеется удовлетворительное соответствие теории и эксперимента.

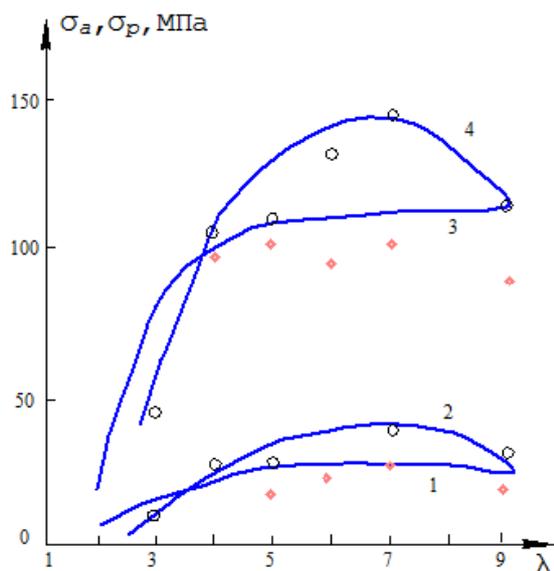


Рисунок 3. Экспериментальные (•,°) и теоретические (1-4) зависимости межфазной прочности σ_a (1, 2) и напряжения разрушения σ_p (3, 4) от степени экструзионной вытяжки λ для композитов СВМПЭ-А1 (1, 3) и СВМПЭ-боксит (2, 4)

Figure 3. Experimental (•,°) and theoretical (1-4) dependences of interfacial strength σ_a (1, 2) and fracture stress σ_p (3, 4) on the degree of extrusion extraction λ for UHMWPE-Al (1, 3) and UHMWPE-bauxite (2, 4) composites

Следует отметить, что параметры λ_m^K и C_v не являются независимыми. Как было показано для композитов на основе полиэтилена

с неориентированной матрицей [10], ухудшение межфазной адгезии вызывает отслаивание полимера от наполнителя, образование полостей на межфазной границе и увеличение деформируемости композита. Аналогичные эффекты наблюдались и для экструдированных композитов [2]. Поэтому следует ожидать взаимосвязи между λ_m^K и C_v . Приведенное на рисунке 3 соотношение между указанными параметрами подтверждает это предположение. Экстраполяция зависимости $C_v(\lambda_m^K)$ к $C_v = 0$ даст величину $\lambda_m^K = 5,7$, что хорошо согласуется с поведением модуля упругости композитов [2, 6].

Выводы. Таким образом, результаты настоящей работы показывают, что прочность экструдированных полимеризационно-наполненных композитов описывается уравнением Лейднера-Вудхэмса и определяется двумя фактами: степенью межфазной адгезии и пределом текучести, повышение которых приводит к увеличению σ_p . Причем степень межфазной адгезии играет в этом процессе двойственную роль: ее ослабление повышает λ_m^K , что положительно сказывается на межфазной прочности σ_a и следовательно σ_p и одновременно увеличивает C_v , что дает противоположный эффект. Однако интегральным следствием ослабления межфазной адгезии является снижение прочности композита.

Список литературы

1. Ahmed S., Jones F.R. A Review of Particulate Reinforcement Theories for Polymer Composites. *Journal of Materials Science*. Vol. 25. No. 12. 1990. Pp. 4933–4942.
2. Beloshenko K.A., Kozlov G.K., Varyukhin V.N. Properties of ultra-high-molecular polyethylene and related polymerization-filled composites produced by solid-state extrusion. *Acta Polym*. 1997. 48. № 5-6. Pp. 181–192.
3. Новокшонова Л. А., Мешкова И. Н. Каталитическая полимеризация на твердых поверхностях как метод введения наполнителей в полиолефины // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 1994. Том 36. № 4. С. 629–639.
4. Watts M.P.C., Zachariades A.E., Porter R.S. Shrinkage as a measure of the deformation efficiency of ultra-oriented high density polyethylene // *Journal of Materials Science*. 1980. Vol. 15. № 2. Pp. 426–430.
5. Argon A.S., Bessonov M.I. Plastic deformation in polyamides, with new implications on the theory of plastic deformation of glassy polymers // *Philosophical Magazine*. 1977. Vol. 35. № 4. Pp. 917–933.
6. Козлов Г. В., Белoshenko В. А., Заика Т. П., Гринев В. Г. Влияние адгезионной прочности в системе полимер-наполнитель на модуль упругости композитов // *Пластические массы*. 1995. № 6. С. 29–30.
7. Beloshenko V.A., Beygelzimer Ya.E., Varyukhin V.N., Grinev V.G. Solid-state extrusion of polymerization-filled polymer compositions // *Mechanics of composite materials*. 1999. T. 35. № 1. Pp. 71–76.

8. Sumita M., Ookuma T., Miyasaka K., Ishikawa K. Effect of ultra fine particles on the elastic properties of oriented polypropylene composites // *Journal of Materials Science*. 1982. Vol. 17. № 11. Pp. 2869–2877.
9. Бобрышев А. Н., Козомазов В. Н., Бабин Л. О., Соломитов В. И. Синергетика композитных материалов. Липецк: НПО ОРИУС, 1994. 153 с.
10. Дубникова И. Л., Горохова Е. В., Горенберг А. Я., Тополкараев В. А. Влияние добавки октаметилциклотетрасилоксана на деформационное поведение дисперсно-наполненных полиолефинов // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 1995. Том 37. № 9. С. 1535–1544.

References

1. Ahmed S., Jones F.R. A Review of Particulate Reinforcement Theories for Polymer Composites. *Journal of Materials Science*. 1990;25(12):4933–4942.
2. Beloshenko K.A., Kozlov G.K., Varyukhin V.N. Properties of ultra-high-molecular polyethylene and related polymerization-filled composites produced by solid-state extrusion. *Acta Polym*. 1997;48(5-6):181–192.
3. Novokshonova L.A., Meshkova I.N. Catalytic Polymerization on Solid Surfaces: a Method for Introduction of Fillers into Polyolefins. *Polymer Science. Series A*. 1994;36(4):629–639. (In Russ.)
4. Watts M.R.S., Zachariades A.E., Porter R.S. Shrinkage as a measure of the deformation efficiency of ultra-oriented high density polyethylene. *Journal of Materials Science*. 1980;15(2):426–430.
5. Argon A.S., Bessonov M.I. Plastic deformation in polyamides, with new implications on the theory of plastic deformation of glassy polymers. *Philosophical Magazine*. 1977;35(4):917–933.
6. Kozlov G.V., Beloshenko V.A., Zaika T.P., Grinev V.G. The influence of adhesive strength in polymer-filler system for the elastic modulus of components. *Russian plastics technology journal*. 1995;(6):29–30. (In Russ.)
7. Beloshenko V.A., BeygelzimerYa.E., Varyukhin V.N., Grinev V.G. Solid-state extrusion of polymerization-filled polymer compositions. *Mechanics of composite materials*. 1999;35(1):71-76.
8. Sumita M., Ookuma T., Miyasaka K., Ishikawa K. Effect of ultra fine particles on the elastic properties of oriented polypropylene composites. *Journal of Materials Science*. 1982;17(11):2869–2877.
9. Bobryshev A.N., Kozomazov V.N., Babin L.O., Solomitov V.I. *Sinergetika kompozitnykh materialov* [Synergetics of composite materials]. Lipetsk: NPO ORIOUS, 1994. 153 p. (In Russ.)
10. Dubnikova I.L., Gorokhova E.V., Gorenberg A.Ya., Topolkaev V.A. The Effect of Octamethyl Cyclotetrasiloxane on the Stress-Strain Behavior of Particulate-Filled Polyolefins. *Polymer Science. Series A*. 1995;37(9):1535-1544. (In Russ.)

Сведения об авторах

Жирикова Заира Муссавна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технической механики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 4378-8131, Author ID: 742730, Scopus ID: 55558043600

Алоев Владимир Закиевич – доктор химических наук, профессор кафедры технической механики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 4533-8035, Author ID: 258589, Scopus ID: 6505993830

Information about the authors

Zaira M. Zhirikova – Candidate of Physic-Mathematical Sciences, Associate Professor of the Chair of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 4378-8131, Author ID: 742730, Scopus ID: 55558043600

Vladimir Z. Alov – Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Chair of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 4533-8035, Author ID: 258589, Scopus ID: 6505993830

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 20.02.2023;
одобрена после рецензирования 06.03.2023;
принята к публикации 16.03.2023.*

*The article was submitted 20.02.2023;
approved after reviewing 06.03.2023;
accepted for publication 16.03.2023.*