

УДК 544.2

А. Н. КОЛОСКОВА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ СТРУКТУР НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ**

Розглядається побудова моделей руйнування зварних швів багатошарових комбінованих структур, виготовлених на полімерній основі. Для оцінки міцності з'єднань побудована удосконалена механічна модель зварного з'єднання з використанням стрижневої моделі полімерної молекули. За результатами аналізу представлених моделей руйнування Т-подібного та напусного швів отримано у формалізованому вигляді умови міцності з урахуванням можливих технологічних недосконалостей при виготовленні з'єднань. Результати дослідження можуть бути використані для розрахунків міцності конструкцій на основі багатошарових комбінованих структур.

**Ключові слова:** багатошарові комбіновані структури, зварний шов, полімер, механічна модель.

Рассматривается построение моделей разрушения сварных швов многослойных комбинированных структур, изготовленных на полимерной основе. Для оценки прочности соединений построена усовершенствованная модель сварного соединения с использованием стержневой модели полимерной молекулы. По результатам анализа представленных моделей разрушения Т-образного и нахлесточного швов получены в формализованном виде условия прочности с учетом возможных технологических несовершенств при изготовлении соединений. Результаты исследования могут быть использованы для расчетов прочности конструкций на основе многослойных комбинированных структур.

**Ключевые слова:** многослойные комбинированные структуры, сварной шов, полимер, механическая модель.

The problems connected to strength analysis of multi-layer combined structures are investigated. The models of destruction of welded joints and strength condition for them are developed. The main result of the investigation is in development of the unified model of destruction of welded joint of polymeric materials. The represented unified model is based on mechanical model of polymer molecule. Using such approach the mechanical models of destruction of T-shaped and lap welded joints are built. It allows to describe the destruction processes and substantiate the significant decrease of their strength in comparison with the basic material. Mechanical models of destruction of T-shaped and lap welded joints of multi-layer combined structures based on polymers are improved by taking into account inter-molecular interaction as a mechanical system. Represented models application allows to estimate the strength conditions for constructions based on multi-layer combined structures in wide variety of manufacturing processes.

**Keywords:** multi-layer combined structures, welded joint, polymer, mechanical model.

**Введение.** Разработка современных конкурентоспособных на внешнем и внутреннем рынках конструкций невозможна без использования новых материалов, обладающих повышенным комплексом механических свойств. Полимерные пленки и комбинированные материалы на их основе представляют в этой связи особый интерес. Они используются во многих сферах человеческой деятельности. Современные требования к таким материалам определяют приоритетность обеспечения их надежной работы в течение длительного времени. Одной из важнейших становится проблема рационального проектирования сварного, как наиболее часто употребляемого, соединения таких материалов в зависимости от вида эксплуатационной нагрузки.

Зачастую конструктивное исполнение сварных соединений полимерных пленок и многослойных комбинированных структур (МКС) на их основе определяется условиями эксплуатации и регламентированными техническими требованиями. Проектирование и расчет таких соединений включают в себя этапы выбора применяемой технологии, рационального размещения сварного шва, а также задания его основных геометрических параметров. В большинстве реализованных на практике проектных расчетов различных видов сварных соединений используются общие методики расчета соединений и формулы, известные из теории металлов. В то же время наиболее часто применяемым сегодня методом определения прочности сварного соединения полимерных пленок является испытание образцов на разрушение под нагрузкой в лабораторных условиях с последующим контролем промышленных изделий [1], что не позволяет прогнозировать поведение

подобных конструкций при переменных внешних воздействиях. Таким образом, актуальной является проблема определения прочности полимеров и их соединений теоретическим путем.

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** В настоящее время все большей популярностью у производителей и потребителей пользуются пленочные полимерные материалы и МКС на их основе [2]. Соединения различных пленок имеют различную относительную прочность. Прочность разных видов соединений, выполняемых из одной и той же пленки, также может существенно различаться. Анализ литературных источников продемонстрировал отсутствие единого мнения касательно того, чем обусловлено указанное явление. К примеру, в работе [3] этот факт авторы объясняют изменением структуры материала при сварке. В работе [4] в качестве причины выбрано наличие механических повреждений околошовной зоны, однако известно, что при сварке нахлесточных и Т-образных соединений одним и тем же методом на одинаковых режимах из одной и той же пленки происходит одинаковое повреждение околошовной зоны и одинаковое изменение структуры материала шва, но в то же время нахлесточные соединения всегда имеют значительно большую прочность, чем Т-образные.

Сегодня в теории прочности и механики разрушения деформируемых твердых тел при расчетах широко используются экспериментальные данные [5, 6]. Теоретические методы физики твердого тела применяются в основном для расчета теоретического предела прочности и только для идеальных материалов —

© А. Н. Колоскова. 2017

материалов с упорядоченной атомной структурой [7]. В работе [8] разрушение соединения полимерных пленок и МКС описано на основании теории трещинообразования. В работе [9] представлен метод вычисления разрушающих напряжений (реальных пределов прочности), возникающих в области адгезионного контакта элементов МКС, основанный на модели многочастичных нелокальных потенциальных взаимодействиях. Данные методы имеют хорошую сходимость теоретических и практических результатов, однако применимы только для отдельных (локальных) элементов слоистой структуры, что не позволяет на их основе перейти к определению геометрических параметров всего соединения в целом.

В работе [10] прочность сварных швов была определена на испытательной машине ИП-5158, в результате эксперимента был сделан вывод, что в результате низкой межслойной адгезии происходит отслаивание пленок в зоне сварного шва. Однако причины данного явления авторами описаны не были.

Таким образом, результаты исследований, представленные в современных публикациях по теме исследования, не дают возможности провести оценку прочности сварного соединения полимерных материалов. Для решения задачи прочности основной проблемой является построение такой модели соединения слоев материала, которая позволила бы оценить не только прочность материала, но и прочность всего сварного соединения в целом с учетом его геометрических характеристик, а также вида нагружения.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью данной работы является повышение эксплуатационных свойств сварных соединений полимерных пленок и многослойных комбинированных структур на их основе.

Для достижения поставленной цели в представленном исследовании были решены следующие задачи:

1. Разработана обобщенная модель разрушения сварного соединения между полимерными слоями.
2. Разработана модель разрушения Т-образного и нахлесточного сварного соединения полимерных слоёв.

**Материалы исследования построения обобщенной модели разрушения сварного шва полимерных пленок и МКС на их основе.** Для оценки прочности (целостности) сварного соединения полимерных пленок предлагается использовать традиционный критерий прочности в следующей формулировке: «прочность сохраняется при условии, что действующие напряжения не превышают своих предельно допустимых значений». В основе построения теоретического метода расчета лежит механическая линейная модель молекулы полимера, представленная автором в работе [11].

Соединение полимерных материалов сваркой происходит за счет перетекания (движения) элементов молекул (звеньев линейной модели) из одного материала в другой. В идеальном случае звенья всех молекул, участвующих в соединении будут располагаться строго по нормали к поверхности свариваемых материалов. Соединяемые материалы удерживаются вместе за счет силы упругости  $F_i$ , возникающей в стержне АВ (рис. 1, а). В рассматриваемой модели

узел А шарнирно закреплен и неподвижен вдоль оси х. Сила уравнивается силами межмолекулярных связей, равнодействующая которых  $P_i$  приложена в точке В. Величина силы трения, возникающая при этом в ползуне, будет прямо пропорциональна силе межмолекулярных связей в свариваемом материале. Величина  $P_i$  зависит от многих факторов, включая взаимное расположение и форму молекул, находящихся вблизи узла В, а также их количество. Определения ее количественного значения в современных литературных источниках отсутствуют.

Если к соединению приложена внешняя нагрузка  $P$ , то расстояние между молекулами будет увеличиваться увеличивая при этом действие межмолекулярных связей, а следовательно значение равнодействующей  $P_i$  будет возрастать, увеличивая при этом напряжение, возникающее в звене АВ (значение силы  $F_i$ ). В работе [12] автором экспериментальным путем было подтверждено, что прочность сварного шва оказывается более чем в сотню раз ниже прочности свариваемых полимерных материалов. Этот результат позволив при построении модели пренебречь деформациями в свариваемых материалах, приняв за основу факт, что разрушение происходит исключительно по зоне сварного шва. В таком случае элемент ВС не будет воспринимать составляющую внешней нагрузки и находится в напряженном состоянии. При достижении силой  $P_i$  максимального критического значения происходит разрушение межмолекулярных связей и узел В выдергивается из слоя в зону сварного шва. Дальнейшее действие внешней силы  $P$  будет восприниматься уже звеном ВС (рис. 1, б).

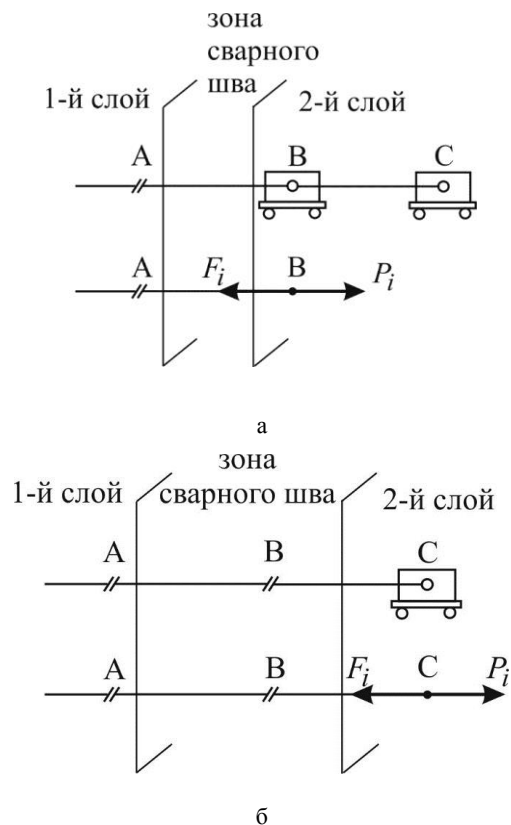


Рис. 1 – Механическая модель поведения молекулы полимерного материала в зоне сварного шва под действием внешней силы

Поскольку реальное сварное соединение состоит из множества соединительных полимерных молекул некоторым количеством  $n$ , уравнение равновесия для такой системы можно представить в следующем формальном виде

$$n F_i = n P_i.$$

Вследствие неидеальности условий получения сварного соединения в наличии в нем технологических дефектов, оно будет состоять не только из молекул, расположенных по нормали к поверхности, но также и расположенных под различными углами к ней (рис. 2).

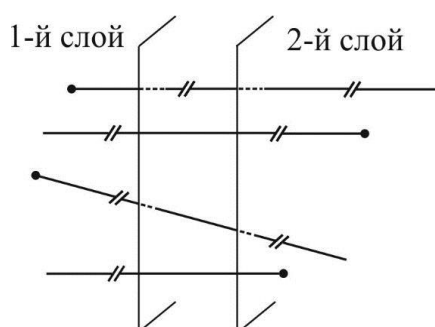


Рис. 2 – Механическая модель сварного соединения полимерных материалов с учетом наличия технологических несовершенств

Согласно положениям статики стержни, представляющие молекулы сварного соединения, начинают воспринимать приложенную нагрузку только после того, как в процессе растяжения шва займут положение по нормали к поверхности. Таким образом, количество звеньев механизма, одновременно воспринимающих нагрузку, будет постепенно возрастать, а прочность сварного соединения зависит в первую очередь от того, какое максимальное количество звеньев молекул могут одновременно воспринимать приложенную к сварному шву нагрузку.

С учетом вышеизложенного, условие прочности сварного шва с учетом технологических несовершенств его изготовления, можно представить в следующем формализованном виде:

$$n P_i \leq [P], \quad (1)$$

где  $n$  – количество звеньев одновременно воспринимающих нагрузку;  $[P]$  – значение предельно допустимого усилия.

**Построение модели разрушения Т-образного сварного шва полимерных пленок и МКС на их основе.** С учетом вышеизложенного, прочность Т-образного сварного шва зависит от количества звеньев, одновременно воспринимающих нагрузку в верхней плоскости. Это позволяет объяснить, к примеру тот факт, что даже при визуальном регистрируемом начале разрушения шва в нем одновременно возникает эффект упрочнения. Механическая модель данного явления представлена на рис. 3.

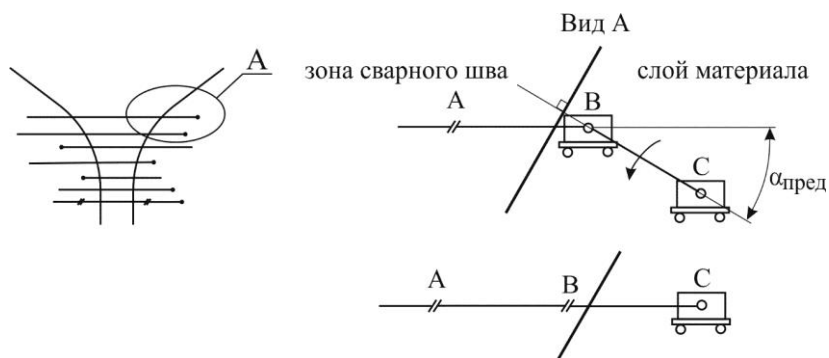


Рис. 3 – Механическая модель разрушения Т-образного шва под действием внешнего воздействия

До приложения разрывающего усилия в идеальном шве все молекулы расположены строго по нормали к поверхности слоев. Однако приложенная нагрузка не только увеличивает усилие, воспринимаемое звеньями механизма, но и разворачивает их на некоторый угол  $\alpha_{пред}$ , который определяется гибкостью молекул материала. При освобождении узла В и переходе его в зону сварного шва, звено ВС сместится в нижележащий молекулярный слой, увеличивая тем самым количество звеньев, одновременно воспринимающих нагрузку на следующем этапе разрушения, что и вызывает возникновение эффекта упрочнения сварного шва. Однако, общее количество звеньев, одновременно работающих на разрыв в Т-образном шве всегда будет меньше, чем при плоскостном отрыве, чем и объясняется его меньшая прочность. Описанным эффектом можно также объяснить и возникающую при разрыве Т-образных соединений неравномерность (скачкообразность) отрыва.

С учетом вышеизложенного, условие прочности Т-образного сварного шва с учетом технологических несовершенств его изготовления можно представить неравенством (1)

**Построение модели разрушения нахлесточного сварного шва полимерных пленок и МКС на их основе.** Растягивающее усилие, приложенное к полимерным пленкам, соединенным внахлест, создает в сварном шве сдвиговые напряжения. Согласно положений теории чистого сдвига, происходит деформация полимерных слоев, что в конечном счете приводит к переориентации (сдвигу) молекул полимера (рис. 4).

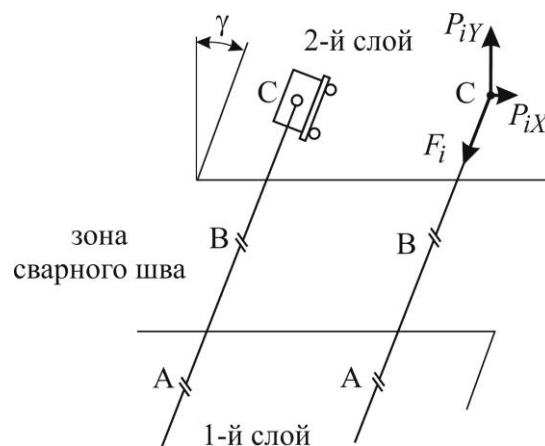


Рис. 4 – Механическая модель разрушения нахлесточного шва под действием внешнего воздействия

Для составления уравнений равновесия сила  $P_i$  может быть разложена по двум составляющим:  $P_{ix}$ , определяющей влияние сдвигового усилия, и  $P_{iy}$ , определяющей влияние межмолекулярных взаимосвязей. В такой постановке уравнения равновесия получают следующий формальный вид:

$$F_i \sin \gamma = P_{ix} \text{ и } F_i \cos \gamma = P_{iy},$$

где  $\gamma$  – угол, определяемый из закона Гука при сдвиге полимерного материала по следующей формуле:

$$\gamma = \tau / G,$$

где  $\tau$  – касательное напряжение, возникающее при сдвиге;  $G$  – модуль упругости II рода (модуль сдвига) для материала.

В идеальном сварном шве, когда все молекулы расположены по нормали к поверхностям материалов, прочность такого шва будет определяться максимальным количеством звеньев, которые одновременно воспринимают нагрузку. Однако, поскольку каждая соединительная молекула внедряется в материал на разное количество звеньев, то при критических условиях нагрузки будет дополнительно проявляться эффект ползучести материала. В то же время, как показано выше, в реальном образце звенья молекул, образующие сварной шов, будут располагаться под разными углами. Следовательно, на начальном этапе нагрузка будет восприниматься звеньями, которые находятся под углом  $\gamma$ , их выдергивание приведет к ослаблению в них натяжения, и функция восприятия нагрузки перейдет на последующие, более короткие соединительные элементы, разворачивая их попутно на угол  $\gamma$ . Таким образом, будет также происходить упрочнение сварного шва.

С учетом вышеизложенного, условие прочности нахлесточного сварного шва с учетом технологических несовершенств его изготовления можно представить в следующем формализованном виде:

$$n \sqrt{P_{ix}^2 + P_{iy}^2} \leq [P].$$

**Результаты исследования сварных швов полимерных пленок и МКС на их основе.** Основным результатом представленного исследования является построение обобщенной модели разрушения сварного соединения полимерных материалов. В основу модели положена механическая модель молекулы полимера. Основываясь на предложенном подходе были построены механические модели разрушения T-образного и нахлесточного сварных соединений, что позволило описать принцип их разрушения и обосновать существенное уменьшение их прочности по сравнению с основным материалом.

В качестве научной новизны впервые предложено для полимерных пленок и МКС на их основе определить прочность сварных соединений различной конструкции не экспериментальным, а теоретическим

путем, основываясь не на адгезии материалов, а на межмолекулярном взаимодействии, рассматривая его как механическую систему.

**Обсуждение результатов исследования сварных швов полимерных пленок и МКС на их основе.** Разработанные модели сварных швов полимерных пленок и МКС на их основе, а также предложенный механический подход к моделированию структуры и процессов разрушения шва под действием внешнего нагружения позволяют нам анализировать его поведение под нагрузкой, а также определять его прочность, как суммарную прочность молекул, как одновременно работающих в одном направлении стержневых механизмов.

Поведение предложенной модели полностью соответствует кривой «напряжение-деформация», полученной для полимера, находящегося в стеклообразном состоянии (рис. 5).

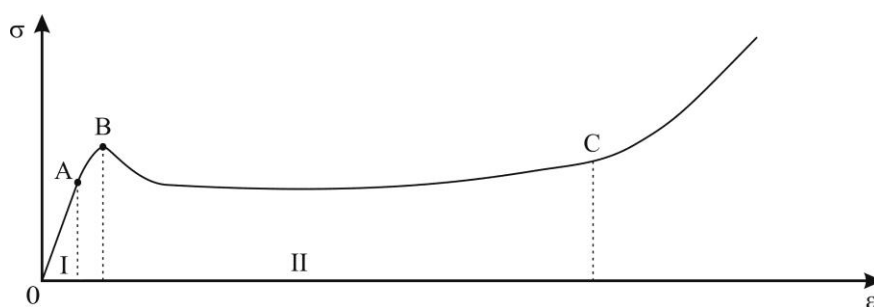


Рис. 5 – График зависимости «напряжение-деформация» для полимера в стеклообразном состоянии

Начальный участок OA кривой соответствует упругой деформации, обусловленной увеличением напряжения в работающем звене молекулы на начальном этапе нагружения. При дальнейшем росте напряжения (участок AB) закон Гука уже не выполняется, при этом происходит вырывание некоторого числа связей и формирование пакета из максимального количества одновременно работающих звеньев (точка B). Далее напряжение снижается. Для идеального полимерного материала это происходит лавинообразно и шов разрушается, для неидеального же разрушение произойдет постепенно в некоторой точке участка BC кривой.

В дальнейших исследованиях для решения задачи определения прочностных свойств сварных соединений полимерных пленок и МКС на их основе необходимым представляется, используя методы статистического анализа, определить количество соосно направленных молекул в сварном соединении, выполненном при различных температурных режимах и для различных материалов.

**Выводы.** Предложен механический подход к моделированию структуры и процессов разрушения сварных соединений полимерных пленок и МКС на их основе под действием внешнего нагружения. Построена обобщенная модель, сформированная на его основе, что позволяет анализировать прочность сварного шва, основываясь на рассмотрении одновременно работающих на растяжение молекул как соосных стержневых механизмов.

На базе предложенного подхода построены модели разрушения Т-образного и нахлесточного соединения МКС на основе полимерных пленок, что в дальнейшем позволит определять прочность таких со-

единений неразрушающими методами, рассматривая соединение как механическую систему и основываясь не на адгезии материалов, а на их межмолекулярном взаимодействии.

#### Список литературы:

1. Кауш, Г. Разрушение полимеров [Текст] / Г. Кауш. – М.: Мир, 1981. – 440 с.
2. Колоскова, А. Н. Классификатор многослойных комбинированных упаковочных материалов [Текст] / А. Н. Колоскова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи і комплекси. – 2017. – № 16 (1238). – С. 7–11.
3. Вакула, В. Л. Влияние фотостарения полиэтилена на его способность к образованию аутогезионной связи при сварке [Текст] / В. А. Вакула, Э. Б. Орлов // Высокомолекулярные соединения. – 1970. – № 12. – С. 2662–2668.
4. Гришин, Н. А. Исследование структуры и механических свойств пластмасс при сварке [Текст] / Н. А. Гришин, Л. Г. Казарян // Пластические массы. – 1969. – № 4. – С. 42.
5. Работнов, Ю. Н. Введение в механику разрушения [Текст] / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1987. – 80 с.
6. Котомин, С. В. Адгезионная прочность в многослойных полимерных пленках [Текст] / С. В. Котомин, К. П. Соллогуб // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2014. – Вып. 5. – С. 1–9.
7. Семин, М. И. Расчеты соединений элементов конструкций из полимерных материалов на прочность и долговечность [Текст]: монография / М. И. Семин. – М.: МАДИ, 2016. – 92 с.
8. Витковский, И. В. Теоретическое определение характеристик прочности многослойных материалов для устройств ядерной и термоядерной техники [Текст] / И. В. Витковский, А. Ю. Лешуков, С. Н. Ромашин, В. С. Шоркин // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, Вып. 12. – С. 62–68.
9. Hutchinson, J. W. Stresses and failure modes in thin films and multilayers [Text] / J. W. Hutchinson. – Technical University of Denmark, 1996. – 45 p.
10. Колбина, Е. Л. Особенности формирования сварных швов многослойных полимерных пленок [Текст] / Е. Л. Колбина, К. В. Флях, Д. С. Григорьев // Динамика систем, механизмов и машин. Омский государственный технический университет. – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 318–321.
11. Колоскова, А. Н. Моделирование полимерных слоев многослойных комбинированных упаковочных материалов [Текст] / А. Н. Колоскова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи і комплекси. – 2016. – № 4 (1176). – С. 16–20.
12. Колоскова, А. Н. Экспериментальное исследование Т-образного сварного соединения полимерных пленок [Текст] / А. Н. Колоскова // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2015. – Вып. 3 (83). – С. 65–68.

#### Bibliography (transliterated):

1. Kaush, G. (1981). Razrushenie polimerov. Moscow: Mir, 440.
2. Koloskova, A. N. (2017). Klassifikator mnogoslnoynh kombinirovannyh upakovochnyh materialov. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Mekhaniko-tehnologichni systemy i komplekxy, 16 (1238), 7–11.
3. Vakula, V. L., Orlov, E. B. (1970). Vliyanie fotostareniya polietilena na ego sposobnost' k obrazovaniyu autogezionnoy svyazi pri svarke. Vysokomolekulyarnye soedineniya, 12, 2662–2668.
4. Grishin, N. A., Kazaryan, L. G. (1969). Issledovanie struktury i mekhanicheskikh svoystv plastmass pri svarke. Plasticheskie massy, 4, 42.
5. Rabotnov, Yu. N. (1987). Vvedenie v mekhaniku razrusheniya. Moscow: Nauka, 80.
6. Kotomin, S. V., Sollogub, K. P. (2014). Adgezionnaya prochnost' v mnogoslnoynh polimernykh plenках. Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii, 5, 1–9.
7. Semin, M. I. (2016). Raschety soedineniy elementov konstruksiy iz polimernykh materialov na prochnost' i dolgovechnost'. Moscow: MADI, 92.
8. Vitkovskiy, I. V., Leshukov, A. Yu., Romashin, S. N., Shorkin, V. S. (2015). Teoreticheskoe opredelenie harakteristik prochnosti mnogoslnoynh materialov dlya ustroystv yadernoy i termoyadernoy tekhniki. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, 85 (12), 62–68.
9. Hutchinson, J. W. (1996). Stresses and failure modes in thin films and multilayers. Technical University of Denmark, 45.
10. Kolbina, E. L., Flyah, K. V., Grigor'ev, D. S. (2016). Osobennosti formirovaniya svarnykh shvov mnogoslnoynh polimernykh plenok. Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, 1 (1), 318–321.
11. Koloskova, A. N. (2016). Modelirovanie polimernykh sloev mnogoslnoynh kombinirovannyh upakovochnyh materialov. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Mekhaniko-tehnologichni systemy i komplekxy, 4 (1176), 16–20.
12. Koloskova, A. N. (2015). Eksperimental'noe issledovanie T-obraznogo svarnogo soedineniya polimernykh plenok. Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruksiy letatel'nykh apparatov, 3 (83), 65–68.

Поступила (received) 10.11.2017

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Моделювання руйнування зварних швів багатослойних комбінованих структур на полімерній основі/ Колоскова Г. М.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 3–8.– Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

**Моделирование разрушения сварных швов многослойных комбинированных структур на полимерной основе/ Колоскова А. Н.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С.3–8. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

**Simulation of destruction of weld joints of multi-layer combined structures made on polymeric basis/ Koloskova G.** //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255).– P.3–8. – Bibliogr.:12. – ISSN 2079-5459

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Колоскова Ганна Миколаївна** – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», доцент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем;

вул. Чкалова, 17, м. Харків, Україна 61070; e-mail: g.koloskova@khai.edu.

**Колоскова Анна Николаевна** – кандидат технических наук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», доцент кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем; ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина 61070; e-mail: g.koloskova@khai.edu.

**Koloskova Ganna** – candidate of technical science, associate professor, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”; Chkalova str., 17, Kharkov, Ukraine 61070; e-mail: g.koloskova@khai.edu.