

Оригинальное исследование

УДК 621.002.3

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_317

EDN: DJDWJU

Исследование прочности полимерной матрицы под влиянием температурно-временного фактора

А.А. Соловьев

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Обширное распространение полимерных композитных (ПКМ) материалов в судостроительной отрасли подтолкнуло к изучению физико-механических свойств ПКМ и в том числе под влиянием температурно-временного фактора являются важными и своевременными. Это дополнительно подтверждается необходимостью совершенствования технологии использования полимеров в виде тонких антифрикционных покрытий в ответственных механизмах.

Цель работы. Исследование прочности полимерной матрицы под влияния температурно-временного фактора. Достижение цели обеспечивается решением следующих задач. Подготовкой материалов и образцов для проведения опытов. Изучением изменения полимерной матрицы при различных температурах спекания композита. Исследованием этапа синтеза (роста) прочности полимера. Созданием математических моделей роста прочности полимера при разных температурах от 200 до 350°C. Исследование этапа падения прочности (деструкции) полимера.

Методы. В качестве объекта исследований был выбран высоко востребованный в последнее время полиамид марки ПА-6/66-3. были использованы как теоретические методы исследования, так и эмпирический — высокотехнологичные опыты с использованием цифровых технологий и обработкой результатов с применением CAE программ.

Результаты. Определено, что температура спекания полимерного материала определяет скорость роста прочности, а зависимость скорости роста прочности от температуры носит линейный характер. Показаны графики зависимости предела прочности от времени спекания при различных температурах, а также произведена аппроксимация экспериментальных кривых. Выявлено, что термическая деструкция полимера протекает до обусловленных значений предела прочности и имеет выраженную точку перегиба.

Выводы. Определено, что закон роста-синтеза прочности можно представить как линейную зависимость от температуры спекания образцов. Касаясь вопроса об изменении коэффициентов в уравнении прямой скорости роста прочности, можно сказать, что они достоверно зависят от температуры плавления. Результаты исследований позволяют дать рекомендации по совершенствованию технологии изготовления изделий из дисперсного полиамидного материала.

Ключевые слова: полиамидная матрица; предел прочности; изменение прочности; скорость роста прочности; полимер; температура; разрушение.

Как цитировать

Соловьев А.А. Исследование прочности полимерной матрицы под влиянием температурно-временного фактора // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 317–325. DOI: 10.52899/24141437_2025_03_317 EDN: DJDWJU

Original Study Article

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_317

EDN: DJDWJU

Investigation of Strength of Polymer Matrix Under the Influence of Temperature Time Factor

Alexander A. Solovev

State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The widespread use of polymer composite materials (PCM) in the shipbuilding industry necessitated the study of the physical and mechanical properties of PCM, including under the influence of temperature time factor, which are important and timely. This is further supported by the need to improve the technology of using polymers in the form of thin antifriction coatings in critical machines.

AIM: To investigate the strength of polymer matrix under the influence of temperature time factor by preparation of materials and samples for experiments; study of changes in the polymer matrix at different composite sintering temperatures; study of the synthesis (growth) of polymer strength; building mathematical models of polymer strength growth at different temperatures from 200 to 350 °C; study of the polymer strength loss (destruction).

METHODS: PA-6/66-3 polyamide, which has been in high demand lately, was selected for the study. Both theoretical research methods and empirical ones were used, including high-tech experiments using digital technologies and processing using CAE software.

RESULTS: It was found that the sintering temperature of a polymer determined the strength growth rate and the dependence of the strength growth rate on temperature was linear. Dependence graphs of the tensile strength and the sintering time at various temperatures are shown and experimental curves are approximated. It was revealed that the polymer thermal degradation proceeded up to the specified tensile strength and had a pronounced inflection point.

CONCLUSION: The study shows that the law of strength growth (synthesis) can be represented as a linear dependence on the sintering temperature of the samples. We can conclude that the coefficients in the equation of the direct rate of strength growth depend significantly on the melting point. The study allows us to make recommendations on improving the manufacturing technology of dispersed polyamide products.

Keywords: polyamide matrix; tensile strength; strength change; strength growth rate; polymer; temperature; fracture.

To cite this article

Solovev AA. Investigation of Strength of Polymer Matrix Under the Influence of Temperature Time Factor. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):317–325. DOI: 10.52899/24141437_2025_03_317 EDN: DJDWJU

ВВЕДЕНИЕ

Исследованиям временной зависимости пластических масс посвящено достаточно много научных трудов отечественных и зарубежных ученых. Основателем термофлуктуационной теории твёрдых тел можно считать С.Н. Журкова [1]. Дальнейшее развитие этой теории получило в фундаментальном труде В.А. Петрова, А.Я. Башкарева, В.И. Веттегрена [2], В.В. Носова [3] и других отечественных ученых [4–8], которые проводили исследования применительно пар трения, на таких материалах, как полиамид ПА6, полиамид ПА66, полиамид ПА12, полиамид ПА54, полиамид ПА610.

В связи с интенсивным развитием водных и воздушных беспилотных изделий высокую востребованность получил спирторастворимый полиамид ПА-6/66-3. Он представляет собой продукты поликонденсации капролактама и соли АГ в различных соотношениях. Он устойчив к воздействию углеводородов (керосин, бензин и др.), кетонов, эфиров масел и щелочей. В виде порошка может быть использован в качестве покрытий на металлические поверхности.

Однако, для указанного полиамида ПА6/66-3, в литературе имеется ограниченное количество информации об использовании его в виде покрытий, получаемых из дисперсного порошка. Причем известные исследования посвящены вопросам адгезии. В тоже время недостаточно изученным остается вопрос поведения полиамида ПА6/66-3 в виде покрытия под влиянием температурно-временного фактора при наличии сил адгезии.

Методика исследований

Для экспериментального определения предела прочности полиамида ПА6/66-3 под влиянием температурно-временного фактора необходимо соблюдение выполнения следующего алгоритма:

- изготовление кассетных матриц, при использовании которых можно было получать шесть образцов, для разрушения;

- просеивание полимерного порошка с целью получения одинаковых размеров частиц для всех образцов;
- преднамеренная выдержка в печи образцов при заданной температуре;
- экспериментальное установление предела прочности каждого образца;
- использованием САЕ программ для обработки полученных результатов, в частности для получения предела прочности.

Особенность конструкции кассеты заключается в том, что она состоит из тонкой медной пластины, алюминиевой фольги, калибратора размера образца и двух фиксаторов. Сборка кассеты осуществлялась в следующей последовательности. На медную пластину укладывалась алюминиевая фольга и затем присоединялась к калибратору. Все три детали скреплялись фиксаторами. Далее в отверстия калибратора засыпался полимерный порошок, излишки которого удалялись. Таким образом, каждый образец формировался из одинакового количества порошка, что обеспечивало одинаковую толщину расплавленного покрытия. С целью повышения производительности проведения экспериментов осуществлялась интеграция образцов в одну структурную единицу — устройство, показанное на рис. 1, как это было сделано в работах [5, 9]. Повышение точности исследований обеспечивалось за счет многократного разрушения одинаковых образцов, при этом, предел прочности находился в виде среднеарифметического от испытания шести образцов. Полученное значение соответствовало одной точке на графике.

Определение численных значений скорости синтеза и деструкции прочности полимера под действием теплового поля осуществлялось путем выдержки образцов в печи при следующих значениях температуры 200, 230, 260, 290, 320, 350°C. Неизменное значение температуры поддерживалось встроенной в печи вентиляцией, которая позволяла достигать разницу температур менее одного процента. Например, при температуре 230°C отклонение значений в любом месте печи не превышало 2°C.

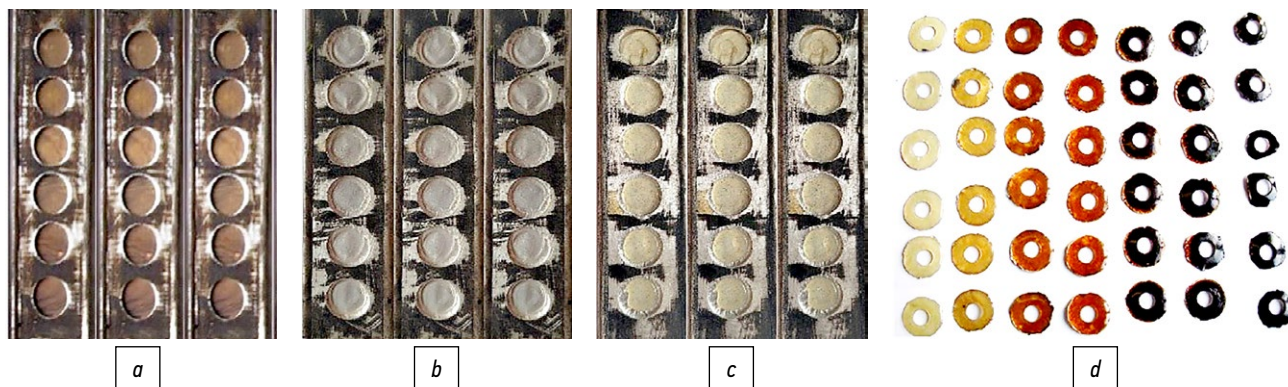


Рис. 1. Структурная единица — устройство для объединения образцов: *a* — устройство с медной пластиной; *b* — устройство с медной пластиной и алюминиевой фольгой; *c* — устройство с оплавленным полимером; *d* — образцы после испытаний.

Fig. 1. Base unit (device used to combine samples): *a*, device with a copper plate; *b*, device with a copper plate and aluminum foil; *c*, device with molten polymer; *d*, samples after testing.

Продолжительность пребывания образцов в печи регистрировалось цифровым хронометром.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Целью данного этапа эксперимента являлось обнаружение этапа синтеза прочности полимера и построение соответствующей кривой, определение точки перегиба и кривой термодеструкции. Для температур 360, 320, 290, 260 и 230°C достаточно было двенадцать интервалов температур выдержки образцов в печи для получения графиков синтеза и деструкции прочности полимера. Особые условия эксперимента потребовались для температуры оплавления полимера 200°C. В частности, для построения графика синтеза прочности достаточно было три интервала времени нагрева образцов в то время, как для определения графика деструкции полимера потребовалось 18 диапазонов термонагрузки. В целом за одну серию экспериментов разрушению подвергалось 480 образцов. Повышение точности экспериментов обеспечивалось трехкратным повторением опытов.

Численные значения роста и падения прочности, полученные в результате опытов, сделали возможным построение графиков зависимости прочности полимера при различных температурах оплавления порошка ПА 6/66-3 в зависимости от времени выдержки в печи представлены на рис. 2.

Анализ полученных зависимостей, представленных в виде графиков, позволяет установить физическую сущность процессов, протекающих в полимерном слое при оплавлении порошка. Для создания математических моделей, описывающих процессы изменения прочности от времени действия температуры, потребовались дополнительные опыты в диапазоне времени от 0 до 30 с

выдержки образцов в печи. В указанном диапазоне времени наблюдается синтез (рост) прочности полимера

По результатам эксперимента были получены данные, представленные в виде графических зависимостей. Для более полного изучения полученных результатов, необходимо было провести подробное математическое описание процесса изменения прочности в зависимости от времени выдержки образцов в печи. Здесь необходимо напомнить, что покрытие формировалось на тонкой алюминиевой фольге. Это осуществлялось умышленно с целью определения предела прочности полимера при наличии адгезионных связей. Этапы роста и падения предела прочности полимерного покрытия нужно рассматривать в отдельности.

Долговечность — срок службы полимерного покрытия зависит от процесса синтеза прочности, поэтому математическое описание следует начать с этого процесса. На рис. 3 показаны результаты экспериментальных исследований. В диапазоне температур от 230 до 350°C, при которых протекает процесс оплавления частиц полимера, время синтеза — роста прочности составляет от 30 до 90 с. Фактически за это время полимерное покрытие приобретает максимальное значение предела прочности. Для построения линии тренда достаточно двух точек. Отдельно следует рассмотреть период оплавление полимера при температуре 200°C. Для получения качественной картины синтеза прочности и математической модели потребовалось четыре точки на графике в первые минуты нагрева образцов.

Приведенный график (рис. 3) показывает, что закон роста-синтеза прочности можно представить как линейную зависимость прочности на этапе оплавления порошка. Для математического описания периода синтеза прочности полимера требуется рассмотреть графики, представленные на рис. 4, характеризующие рост прочности.

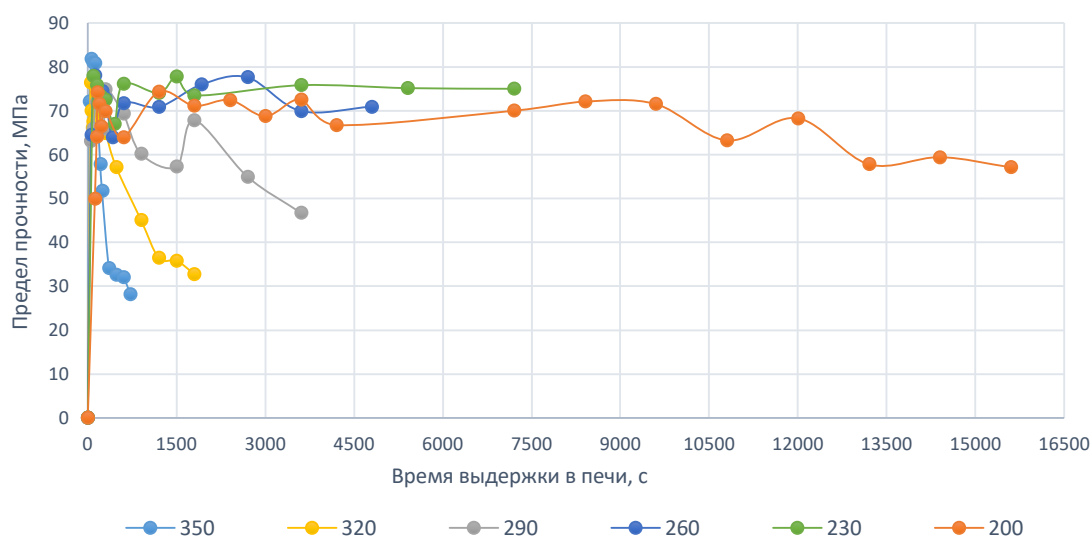


Рис. 2. Графики изменения прочности во времени при различных температурах спекания полимера П 6/66-3.

Fig. 2. Graphs of strength behavior in time at different sintering temperatures of polymer P 6/66-3.

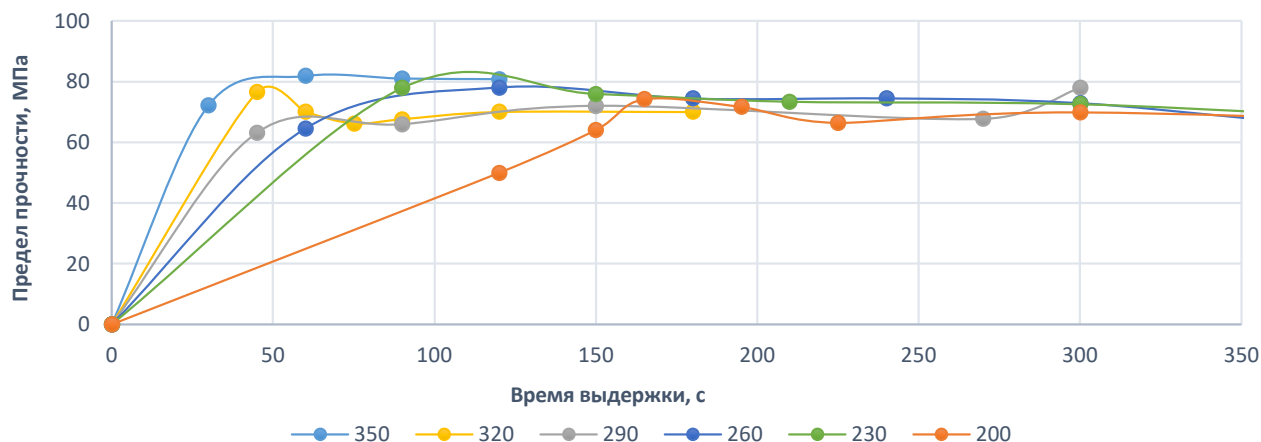


Рис. 3. Изменение прочности полимерного материала в диапазоне времени от 0 до 350 с.

Fig. 3. Polymer strength behavior in the time range from 0 s to 350 s.

Для построения графиков во внимание принимались два численных значения при каждой температуре, одна из которых соответствовала нулевому значению предела прочности. Вторая точка соответствовала минимальному численному значению предела прочности, полученному за минимальное время оплавления порошка. Здесь за минимальное время оплавления принимается интервал времени, соответствующий началу пленкообразования, соответствующий процессу поперечной сшивки полимерных связей [5, 9].

Передача тепла полимерному порошку, как и многие процессы теплопередачи носит нестационарный характер. В связи с чем получение значений максимальной прочности полимерного покрытия требует знания минимального значения времени, в течение которого протекает этот процесс. Под наименьшим временем оплавления следует понимать такой интервал, который соответствует формированию пленкообразования за счет образования новых структурных групп и макромолекул [5, 9]. Наименьшее время, в процессе проведения эксперимента,

устанавливалось методом последовательных приближений. Данный метод основан на установлении времени, соответствующего не всеобъемлющему расплавлению частиц полимера. Партии образцов помещались в печь через определенные промежутки времени. Сначала на первых образцах определялось время полного оплавления полимерного порошка. Далее следующие образцы извлекались из печи раньше на 15–20 с. Применение метода последовательных приближений позволило получить точки, расположенные на прямой роста.

Уравнения прямых прочность — время, для разных температур оплавления полиамида приведены ниже:

температура 350°C

$$\sigma_B = 2,4048t, \quad (1)$$

температура 320°C

$$\sigma_B = 1,6993t, \quad (2)$$

температура 290°C

$$\sigma_B = 1,4033t, \quad (3)$$

температура 260°C

$$\sigma_B = 1,0753t, \quad (4)$$

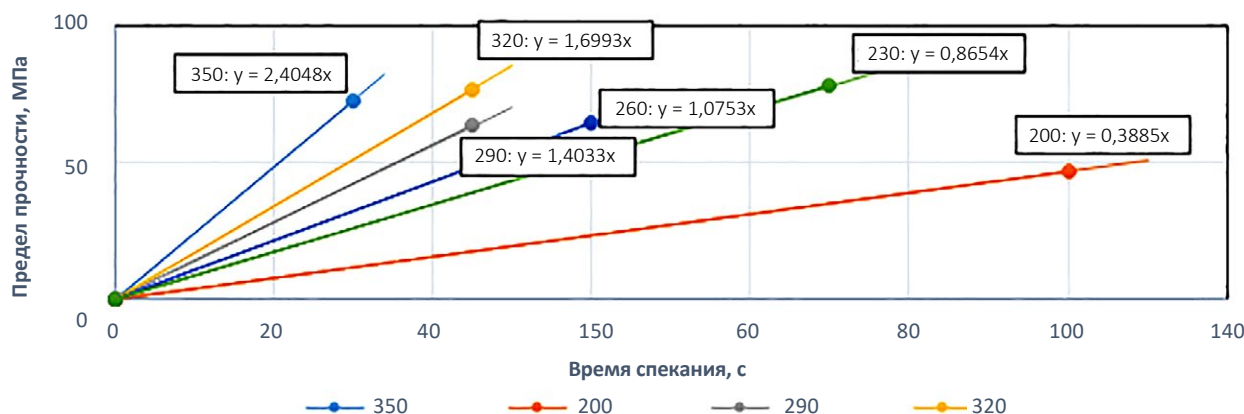


Рис. 4. Зависимости роста прочности полимера от времени оплавления при разных температурах.

Fig. 4. Dependences of polymer strength growth on melting time at different temperatures.

температуры 230°C

$$\sigma_B = 0,8654t, \quad (5)$$

температура 200°C

$$\sigma_B = 0,3885t, \quad (6)$$

где σ_B — предел прочности, МПа; t — время спекания, с. Коэффициент при времени спекания имеет размерность — МПа/с, что соответствует скорости роста-синтеза прочности.

Угол наклона прямых, согласно рис. 4, зависит от температуры. В свою очередь тангенс угла наклона прямой соответствует скорости роста прочности полимера при расплавлении отдельных частиц. График зависимости тангенса угла наклона прямой (скорости роста прочности) от времени спекания, приведен на рис. 5.

На рис. 5. вместе с экспериментальной зависимостью построена аппроксимирующая прямая, уравнение которой можно принять в виде:

$$V\sigma = 0,0123T - 2,0754, \quad (7)$$

где $V\sigma$ — скорость роста прочности МПа/с; T — температура оплавления.

Таким образом, оказалось, что скорость роста прочности имеет линейную зависимость от температуры оплавления.

Используя данные математическим выкладкам можно сделать вывод о том, что температура оплавления полимерного порошка обуславливает скорость роста прочности. Зависимость скорости роста прочности от температуры представляет явно выраженный линейный характер.

Изменение коэффициентов в уравнениях прямых скорости роста прочности, подлинно показывают зависимость от температуры плавления.

Обобщая полученные результаты и делая вывод относительно этапа роста, можно сказать, что процесс роста прочности поддается достаточно простому математическому описанию.

Переходя к рассмотрению периода падения прочности, обратимся к графикам, построенным на основании опытов и изображенных на рис. 6.

На рис. 6. показаны графики зависимости предела прочности от времени спекания при различных температурах, а также произведена аппроксимация экспериментальных кривых. Первоначально, аппроксимация

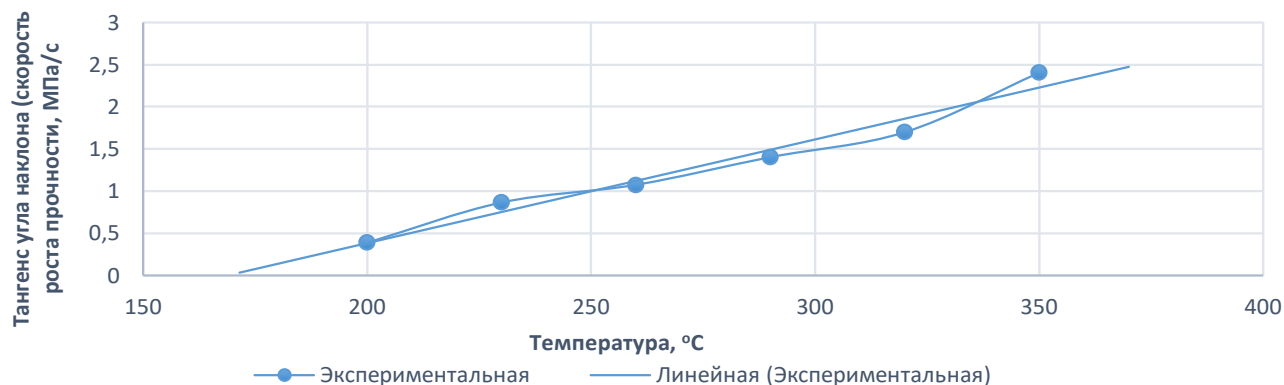


Рис. 5. Зависимость скорости роста прочности от температуры спекания.

Fig. 5. Dependence of strength growth rate on the sintering temperature.

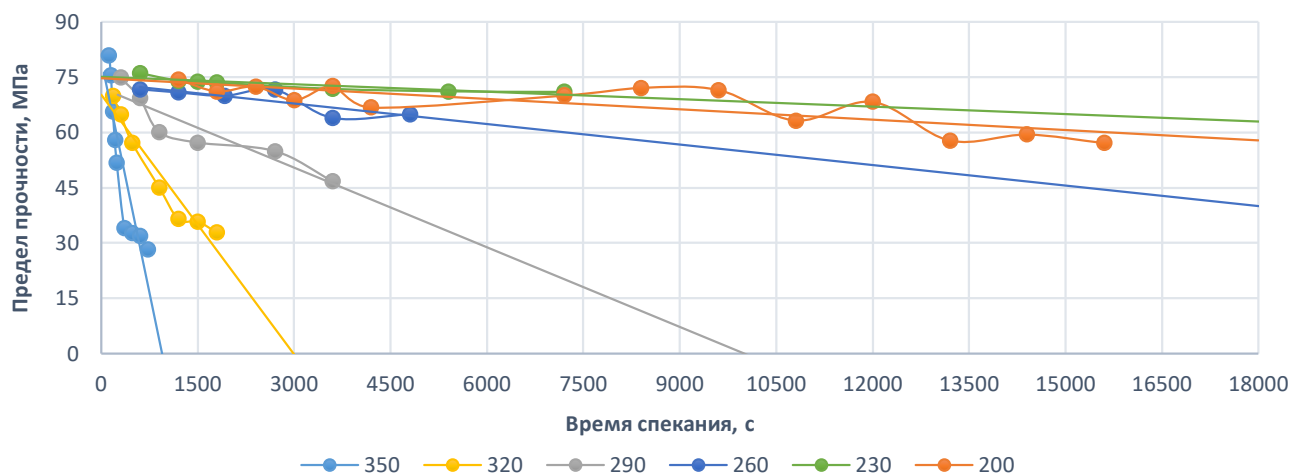


Рис. 6. Графики зависимости падения предела прочности от времени нахождения в печи при различных температурах спекания.

Fig. 6. Dependence graphs of tensile strength loss and the time spent in the furnace at different sintering temperatures.

производилась экспоненциальными контурами тренда, т.е. характер изменения прочности во времени казался, носил экспоненциальную выраженность, но после проведения уточняющих стадий эксперимента, пришли к мнению, что целесообразнее перейти к линейному характеру.

По экспериментальным данным были построены аппроксимирующие прямые описывающие зависимость изменения предела прочности от времени спекания полимера, которые могут быть описаны следующими выражениями:

При температуре 350°C

$$\sigma_B = -0,0840909t + 79,5414780, \quad (8)$$

При температуре 320°C

$$\sigma_B = -0,0234812t + 70,2245071, \quad (9)$$

При температуре 290°C

$$\sigma_B = -0,0072032t + 72,0640143, \quad (10)$$

При температуре 260°C

$$\sigma_B = -0,0018547t + 73,4126772, \quad (11)$$

При температуре 230°C

$$\sigma_B = -0,0006742t + 75,1000949, \quad (12)$$

При температуре 200°C

$$\sigma_B = -0,0009374t + 74,7189685, \quad (13)$$

где σ_B — предел прочности полимера; t — время нахождения образцов в печи.

Для построения математической модели процесса падения прочности, как и в случае ее роста, необходимо определить зависимость тангенса угла наклона прямой (скорости падения прочности) от температуры спекания. Остается вопрос, как объяснить, предел прочности при температуре 200°C падает больше, чем при температуре 230°C. Необходимо более тщательно проанализировать участок падения предела прочности.

Проведение дополнительных, уточняющих экспериментов участка падения прочности рис. 7 показали ранее не обнаруженные результаты.

Оказывается, термическая деструкция полимера протекает до обусловленных значений предела прочности и имеет выраженную точку перегиба. Причем как до неё, так и после графики описываются линейными зависимостями. Однако точка перегиба имеет численные значения, находящиеся ниже допустимых предельных значений.

При рассмотрении уточняющих графиков, наблюдаются участки, на которых уже практически не наблюдается падения прочности полимера. Таким образом, можно считать, что падение предела прочности достигает какого-то значения, в нашем случае это порядка 32–35 МПа.

Из уравнений прямых (см. рис. 7) видно, что свободный член уравнения для температуры спекания 350°C (102,39 МПа) отличается от свободных членов других линейных уравнений (≈ 73 МПа). Такое отличие можно объяснить тем фактом, что на реальных графиках изменения предела прочности во времени переход с участка роста на участок падения происходит плавно. Кроме того, можно сказать, что имеется участок, на котором предел прочности фактически не меняется. Данный участок при различных температурах имеет свои временные рамки существования, но при построении математической модели пренебрегаем этим участком, вследствие его малого существования по времени спекания. Из-за пренебрежения этим участком, в теоретической модели происходит смещение по временной оси прямой падения прочности, что приводит к уменьшению значения свободного члена линейного уравнения прямой падения. После проведения уточняющих мероприятий, можно построить график зависимости скорости падения прочности от температуры спекания. Данная зависимость приведена на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что зависимость скорости падения предела прочности от температуры спекания носит экспоненциальный характер и описывается выражением:

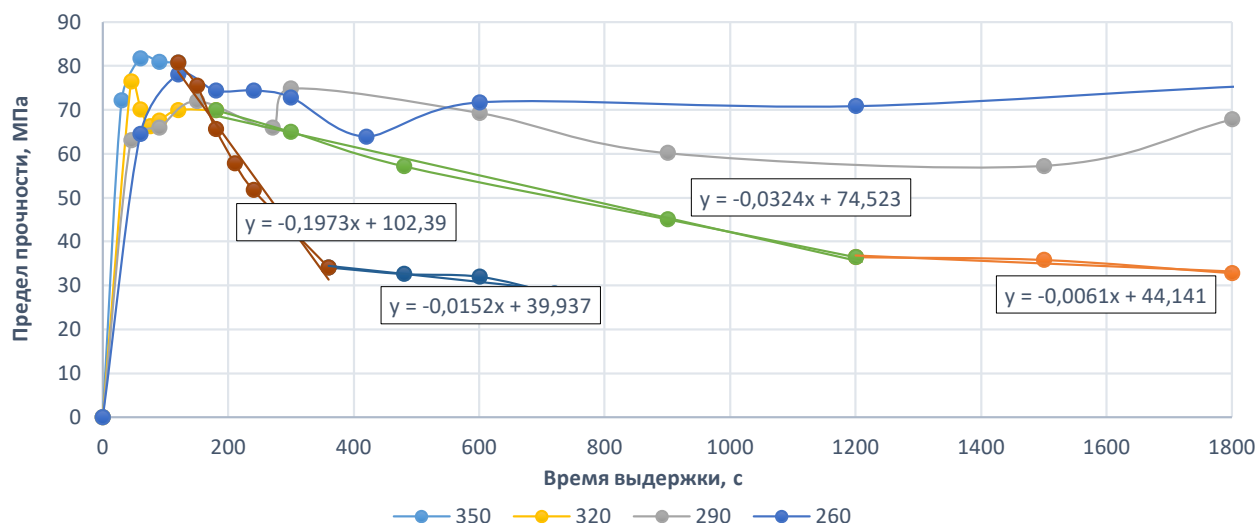


Рис. 7. Уточняющие графики.

Fig. 7. Refinement graphs.

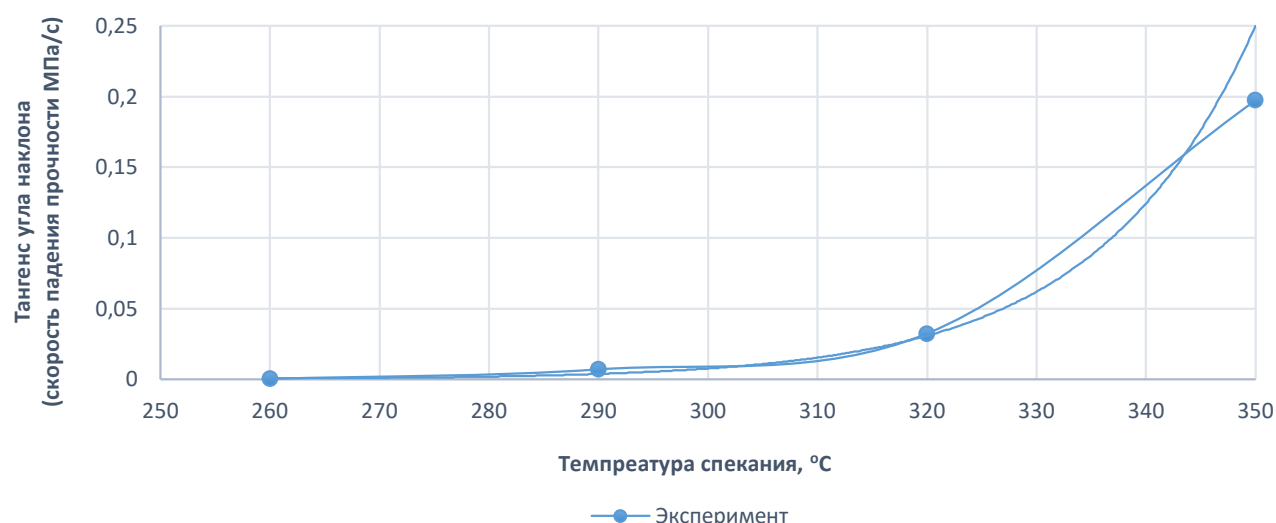


Рис. 8. График зависимости скорости падения прочности от температуры спекания.

Fig. 8. Dependence graph of strength loss rate and the sintering temperature.

$$V_{\sigma_{II}} = 6e^{-12e^{0,0698}T}, \quad (14)$$

где $V_{\sigma_{II}}$ — скорость падения прочности МПа/с; T — температура спекания.

Относительно экспоненциального закона зависимости скорости падения прочности — деструкции полимера от температуры спекания, можно сказать следующее: на экспоненциальной кривой можно выделить два участка, на которых поведение скорости падения прочности существенно отличаются. Так для температур спекания меньше 300–310 °C, скорость падения прочности достаточно мала, а для температур ниже 240–250 °C скорость падения прочности вообще близка к нулю.

ВЫВОДЫ

Таким образом, установлено, что закон роста-синтеза прочности можно представить как линейную зависимость от температуры спекания образцов. Указанная температура определяет скорость роста прочности, причем зависимость скорости роста прочности от температуры носит явно выраженный линейный характер.

Касаясь вопроса об изменении коэффициентов в уравнении прямой скорости роста прочности, можно сказать, что они достоверно зависят от температуры плавления.

На основании проведенных экспериментов можно дать рекомендации применительно технологии изготовления изделий из дисперсного полиамидного материала по достижению оптимальным режимов переработки его в изделия. Например, если учесть, что температура плавления составляет порядка 170 °C, то оптимальные рамки для осуществления температурных воздействий на полимерное изделие составляют 200–240 °C.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Автор статьи одобрил ее рукопись (версию для публикации).

Источники финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали один рецензент, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: The author approved the version of the manuscript to be published.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The author has no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журков С.Н., Нарзулаев Б.Н. Временная зависимость прочности твердых тел // ЖТФ. 1953. Т. 23, № 10. С. 1677–1688.
2. Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. СПб.: Политехник, 1993.
3. Носов В.В. Принципы акустико-эмиссионной диагностики процесса разрушения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1994. № 7–9. С. 7.
4. Сагалаев Г.В., Симонов-Емельянов И.Д. Оценка свойств межфазного слоя в наполненных системах // Пластические массы. 1989. № 3. С. 48–51.
5. Стукач А.В., Соловьев А.А. Прочность и адгезия наполненных порошками и фуллереном C60 полиамидов. СПб.: Изд.–полгир. асс. высш. уч. зав., 2020. EDN: GYPTTD

6. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. Л.: Химия, 1972.
7. Берг Л.Г. Введение в термографию. М.: Наука, 1969.
8. Айсс Н.С. Трение и изнашивание полимеров. В кн.: Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. С. 176–189.
9. Соловьев А.А. Влияние эксплуатационных факторов на адгезионную прочность антифрикционных покрытий. В кн.: Актуальные проблемы морской энергетики: материалы одиннадцатой международной научно-технической конференции. СПб.: СПбГМТУ, 2022. doi: 10.52899/9785883036322_385_388 EDN: URYVGX

REFERENCES

1. Zhurkov SN, Narzulaev BN. The time dependence of the strength of solids. *ZhTF*. 1953;23(10):1677–1688.
2. Petrov VA, Bashkarev AY, Vettegren VI. *Physical foundations of forecasting the durability of structural materials*. Sankt Petersburg: Polytechnic; 1993. (In Russ.)
3. Nosov VV. Principles of acoustic emission diagnostics of the process of destruction. *Proceedings of higher educational institutions. Mechanical engineering*. 1994;7–9:7. (In Russ.)
4. Sagalaev GV, Simonov-Emelyanov ID. Evaluation of the properties of the interfacial layer in filled systems. *Plastic masses*. 1989;3:48–51. (In Russ.)
5. Stukach AV, Soloviev AA. *Strength and adhesion of polyamides filled with powders and fullerene C60*. Sankt Petersburg : Izd.–poligr. ass. vyssh. uch. zav.; 2020. (In Russ.)

6. Bartenev GM, Lavrentiev VV. *Friction and wear of polymers*. Leningrad: Khimiya; 1972. (In Russ.)
7. Berg LG. *Introduction to thermography*. Moscow: Nauka; 1969. (In Russ.)
8. Aiss NS. Friction and wear of polymers. In: *Tribology: Research and applications: the experience of the USA and CIS countries*. New York: Allerton Press, 1993:176–189.
9. Soloviev AA. The influence of operational factors on the adhesive strength of antifriction coatings. In: *Actual problems of marine energy: materials of the eleventh International Scientific and Technical Conference*. Sankt Petersburg: SPbGMTU; 2022. (In Russ.)

ОБ АВТОРЕ

Соловьев Александр Александрович,

старший преподаватель кафедры деталей машин и подъемно-транспортных механизмов, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;
адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лотманская, д. 3;
eLibrary SPIN: 9393-1497;
e-mail: asolneva@mail.ru

AUTHOR INFO

Alexander A. Soloviev,

Senior Lecturer at the Department of Machine Parts and Lifting and Transport Mechanisms, graduate student, Saint Petersburg State Marine Technical University,
address: 3 Lotsmanskaya st, 190121, Saint Petersburg, Russia;
eLibrary SPIN: 9393-1497;
e-mail: asolneva@mail.ru