

УДК 678.073

Г.Н. Петрова¹, И.В. Старостина¹, Т.В. Румянцева¹, Ю.А. Сапего¹

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИКАРБОНАТА ТЕРМООБРАБОТКОЙ

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-6-6

Приведены результаты исследований по влиянию режимов термообработки поликарбоната на качество изготавливаемых из него изделий. Показано, что выбор термопласта обусловлен высоким уровнем физико-механических свойств, размерной стабильностью, высокой точностью при литье, хорошим декоративным видом, а также расширением областей его применения.

Приведены условия необходимости проведения термообработки для данного материала. Показано, что простые по конфигурации, тонкостенные, неответственного назначения детали можно не подвергать термообработке; в то же время детали, работающие в области высоких температур, в поверхностно-активных средах, сложной конфигурации и имеющие металлическую арматуру, целесообразно подвергать термообработке. Приведены результаты влияния различных режимов термообработки (закалка, отжиг и др.) на физические, прочностные и деформационные свойства образцов материала.

На основании полученных результатов испытаний выбраны оптимальные варианты термообработки поликарбоната.

Ключевые слова: *качество, поликарбонат, глицерин, масло, ультразвук, термообработка, отжиг.*

Results of researches on influence of modes of heat treatment of polycarbonate are given in article on quality of products made of it, Is shown that the choice of thermoplastic is caused by high level of the physicist – mechanical properties, dimensional stability, high accuracy when molding, good decorative look, and also expansion of areas of its application.

Conditions of need of carrying out heat treatment for this material are given. It is shown that simple on configuration, thin-walled, irresponsible assignment of detail can be not subjected to heat treatment; at the same time the details working in the field of high temperatures, in surface-active environments, details of difficult configuration and having metal armature, it is reasonable to subject to heat treatment. Results of influence of different modes of heat treatment (tempering, annealing, etc.) on physical, strength and deformation properties of samples of material are given.

On the basis of the received test results optimum options of heat treatment of polycarbonate are chosen.

Keywords: *quality, polycarbonate, glycerin, oil, ultrasound, heat treatment, annealing.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Управление качеством – основное средство достижения и поддержания конкурентоспособности любого предприятия. В создании качественного продукта участвуют все сотрудники предприятия – начиная от непосредственного исполнителя (рабочего, лаборанта) и заканчивая административными органами предприятия. Необходимо отметить, что качество любого продукта обеспечивается на всех без исключения стадиях

производства. Важно соблюдать требования нормативной документации: государственных стандартов, стандартов отрасли и предприятия, технических условий, технологической документации, а также следить за техническим состоянием оборудования – соблюдать сроки проведения планово-предупредительного ремонта, проверки на технологическую точность. Сотрудники должны проходить обучение и курсы повышения квалификации в установленные сроки. Прежде чем создавать качественный материал, необходимо выяснить потребности общества в этом материале, насколько потребителю необходим тот или иной вид продукции и нравится ли он ему. Материал, который соответствует всем техническим требованиям, но не востребован потребителем, не может считаться качественным [1–4].

В настоящее время одним из самых перспективных материалов, выпускаемых отечественной промышленностью, является поликарбонат [5–12]. Для данного полимера характерны удачное сочетание физико-механических свойств с размерной стабильностью, высокой точностью при литье и хорошим декоративным видом. Поликарбонат отвечает требованиям авиационных правил АП-25 по пожаробезопасности, детали из него – технологичные, легкие и прочные [5–7, 11, 13].

Постоянно расширяются и области применения данного материала: если ранее одним из его основных применений являлась приборная техника, то в настоящее время поликарбонат внедряется в одно из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства – аддитивные технологии (AF – Additive Manufacturing) или технологии послойного синтеза (ТПС). Использование его в данной отрасли стало возможным благодаря высоким значениям прочности и ударной вязкости, а также устойчивости к высоким и низким температурам [14–21].

Однако серийно выпускаемый поликарбонат в условиях повышенных напряжений и влажности обладает склонностью к растрескиванию, в результате чего детали при эксплуатации часто выходят из строя. Наибольшую опасность для деталей из поликарбоната, особенно при наличии внутренних напряжений, представляет тепло-влажностное воздействие.

Часто трещинообразование начинается уже в процессе производства, когда допущены какие-либо нарушения технологического процесса. Но даже при очень тщательном контроле всего технологического процесса, в связи с малой теплопроводностью термопластов, при их формовании имеют место неравновесные тепловые процессы, приводящие к образованию в объеме изделия внутренних напряжений.

Возникновение напряжений является следствием замедления релаксационных процессов при понижении температуры. Величина и распределение их в отливке зависит от ее конфигурации, параметров процесса литья, конфигурации формы, вида перерабатываемого материала.

В последние годы очень часто для изменения структуры и свойств полимерных деталей в заданном направлении и повышения срока их службы, т. е. для повышения качества изделий из поликарбоната, пользуются их дополнительной обработкой после литья.

В этой области большие работы проведены В.В. Коршаком, К.А. Москатовым, Н.Я. Кестельманом [23–25].

Правильный выбор вида и условий обработки имеет существенное значение с точки зрения ее результативности для конкретной детали. С помощью термической обработки можно снизить внутренние напряжения, изменить физико-механические свойства – такие как твердость, температура размягчения, износостойкость, химическая стойкость.

К.А. Москатов предложил в зависимости от условий и целей обработки следующую классификацию [23]:

1. Нормализация – преимущественно для снятия внутренних остаточных напряжений в изделиях: нагрев до критической температуры, выдержка, охлаждение на воздухе.
2. Отжиг – преимущественно для улучшения физико-механических и физико-химических свойств: нагрев до критической температуры, выдержка, охлаждение в среде.
3. Закалка – в специальных случаях для предупреждения трещинообразования в поликарбонате: нагрев до критической температуры, резкое охлаждение.
4. Отпуск – для снижения жесткости изделий: нагрев до температуры, составляющей 50–60% от критической, выдержка и медленное охлаждение в той же среде.
5. Смешанная термообработка – в основном для деталей узлов трения.
6. Ступенчатая термообработка – преимущественно для толстостенных изделий сложной конфигурации из кристаллических термопластов.
7. Циклическая термообработка – многократный отжиг: преимущественно для достижения стабильности размеров изделий.
8. Специальная термообработка – преимущественно для ускорения изменения структуры изделия: нагрев, выдержка, охлаждение в среде, допускается применение ультразвука, токов высокой частоты, «теплого удара».

Из приведенной классификации следует, что основными факторами обработки являются среда, температура, продолжительность нагрева, выдержки и охлаждения. Причем до настоящего времени нет еще единого мнения в вопросе о наиболее существенном факторе процесса обработки. По мнению одних исследователей, в процессе обработки преобладает влияние среды на изменение свойств, по мнению других – главное влияние оказывают температура и продолжительность процесса. Среду для проведения обработки выбирают с учетом гидрофильности конкретного полимера, назначения обработки, условий эксплуатации изделия.

В работе [23] существуют рекомендации по выбору температуры обработки полимерных материалов по значению температуры кристаллизации:

- для кристаллических – $T_{кр}=(70–85)\%$ от $T_{пл}$;
- для аморфных – $T_{кр}=(50–60)\%$ от $T_{пл}$.

В связи с тем, что полимерные материалы обладают низкой теплопроводностью, продолжительность прогрева изделий из них должна быть достаточной, чтобы прогрев осуществлялся по всей толщине изделия.

В последнее время распространение получило применение для обработки полимерных изделий ультразвука. Однако применение ультразвука носит избирательный характер, так как у некоторых полимерных материалов он снижает прочностные свойства [23].

В группе термопластичных материалов поликарбонат занимает особое место: промежуточное положение между полностью кристаллическими и полностью аморфными термопластами.

Рентгенографически установлено, что степень кристалличности поликарбоната в обычных промышленных изделиях составляет 10–40%. В процессе обработки возможно повышение степени кристалличности в поверхностных слоях [23, 24]. Признаком начала кристаллизации может служить изменение цвета материала и его помутнение.

По вопросу о необходимости проведения термообработки для деталей из поликарбоната, а также об условиях ее проведения в научной литературе нет единого мнения. В работе [23] указано, что для поликарбоната существует критическая температура в диапазоне 100–115°C, при которой термообработка дает отрицательные результаты. Отмечается, что исследования, проведенные в Германии и России, показали нежелательность применения воды в качестве среды для термообработки, так как при этом, так же как при наличии влаги при переработке, возможно протекание процессов

деструкции. Однако в авторском свидетельстве №804659 [25] предложен способ обработки крупногабаритных изделий из поликарбоната для снижения внутренних напряжений в смеси с 2–30% воды и глицерина при температуре 120°C в течение 20 мин с охлаждением на воздухе.

Поликарбонат очень мало адсорбирует воду, стоек к маслам. С целью изменения физико-механических свойств рекомендуют [24] проводить термообработку деталей из поликарбоната в силиконовом масле при температуре 135°C в течение 80 мин, однако при этом снижается относительное удлинение при разрыве.

В проведенных ранее исследованиях по влиянию термообработки при температуре 130°C в течение 5–250 ч на свойства поликарбоната отмечено увеличение хрупкости, повышение предела текучести при разрыве по сравнению с нетермообработанным материалом, причем степень хрупкости не зависела от продолжительности термообработки и скорости охлаждения материала. Кроме того, в процессе термообработки наблюдалось увеличение плотности и степени упорядочения аморфной структуры. При термообработке ниже 100°C не было обнаружено изменения свойств поликарбоната.

В данной статье приведены результаты исследований по влиянию режимов термообработки поликарбоната на качество изготавливаемых из него изделий (образцов).

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [26].

Методика эксперимента

Для проведения исследований использован поликарбонат (ТУ 6-05-1668). Механические свойства материалов оценивали путем испытаний на растяжение образцов (лопатки – тип 2), полученных способом литья под давлением на термопластавтомате со шнековой пластикацией марки ARBURG 320C 500-170 (Германия).

Оценку механических свойств осуществляли по стандартным методикам в соответствии со следующей нормативной документацией:

- предел текучести при разрыве, предел прочности при растяжении и относительное удлинение при разрыве – по ГОСТ 11262;
- ударная вязкость на образцах без надреза – по ГОСТ 14235.

«Серебростойкость» поликарбоната оценивали при воздействии поверхностно-активной среды CCl_4 . Образцы погружали в CCl_4 на 30 с, извлекали и осматривали с помощью лупы при увеличении $\times 2,5$.

Результаты

Как упоминалось ранее, несмотря на довольно продолжительное время работы с поликарбонатом, нет единого мнения как относительно необходимости термообработки деталей из поликарбоната, так и о ее режимах. В проведенных ранее работах авторами показано, что для армированных деталей ответственного назначения введение в технологический процесс термообработки на воздухе при температуре 120°C в течение 5 ч существенно повышает их стойкость к растрескиванию. Установлено также, что детали следует подвергать термообработке не позже чем через 24 ч после изготовления. Детали, обработанные через 6 ч после изготовления, отличаются наиболее узким интервалом разброса показателей и высокими абсолютными значениями физико-механических свойств. Это подтверждено и в работе [1], где указывается, что за это время в изделиях завершается основная технологическая усадка (85% усадки) и образуется соответствующая надмолекулярная структура.

Далее в процессе работы проведено исследование влияния различных режимов термообработки, приведенных в табл. 1, на физико-механические свойства поликарбоната.

Таблица 1

Режимы термообработки поликарбоната

Условный номер режима	Среда	Температура, °С	Продолжительность нагрева (охлаждения), ч
1	Воздух	100	8
2		120	5
3		130	4
4		145	3
5	Воздух	130	2
		-60	20
6		130	5
		-60	20
7		145	0,25
		-60	20
8	Глицерин	100	5
9		120	1
10		145	0,3
11		145	0,5
12		Глицерин+ультразвук	120
13	Масло МС-20	100	6
14		120	1
15		120	6
16		145	0,25

Термообработку типа отжига (варианты 1–4 и 8–16) осуществляли следующим образом: образцы, помещенные в сосуд с глицерином или маслом МС-20 или в каретки при обработке на воздухе, помещали в холодный термощкаф. Затем производили подъем температуры до нужной величины, выдерживали при температуре и охлаждали вместе со шкафом.

Обработанные в глицерине образцы промывали под струей теплой воды, после обработки в масле МС-20 – бензином или спиртобензиновой смесью.

Проводили и закалку материалов (варианты 5–7). В этом случае прогретые при температуре 130–145°С образцы подвергали резкому охлаждению при -60°С и выдерживали при этой температуре длительное время.

Ранее авторами установлено, что для поликарбоната наиболее чувствительными характеристиками, реагирующими на воздействие различных факторов, являются удлинение при разрыве и предел текучести при растяжении. Поэтому при выборе оптимального режима термообработки исследования проводили на образцах на растяжение и ударную вязкость.

При оценке влияния различных режимов термообработки сравнивали абсолютные значения механических свойств и их стабильность, а также стойкость к растрескиванию под действием поверхностно-активных сред.

В табл. 2 и 3 приведены результаты испытаний поликарбоната.

Анализ приведенных данных показывает, что термообработка образцов из поликарбоната резко повышает их «серебростойкость». Возникновение и рост трещин в поверхностно-активных средах будут происходить лишь при наличии в отливке внешних растягивающих напряжений. Следовательно, в процессе термообработки опасные поверхностные растягивающие напряжения практически уничтожаются. Значения температуры размягчения по Вика не зависят от предварительной обработки, практически одинаковы для всех исследованных образцов и находятся в пределах ошибки опыта.

Таблица 2

Влияние режимов термообработки (ТО) на прочностные, ударные и деформационные характеристики поликарбоната

Условный номер режима	Предел прочности при растяжении σ_p , МПа	Относительное удлинение при разрыве δ_p , %	Предел текучести при растяжении σ_t , МПа	Ударная вязкость a_k , кДж/м ²
Без ТО	63,5	80	64,5	100
1	64,5	85	71,0	110
2	63,5	85	73,5	105
3	58,0	40	76,0	110
4	60,0	45	77,5	115
5	68,0	90	74,5	105
6	56,0	40	77,5	110
7	60,5	50	72,5	115
8	65,0	80	69,5	105
9	67,0	90	69,0	–
10	61,5	65	73,0	105
11	57,5	40	76,0	115
12	56,0	45	71,0	105
13	62,0	85	69,0	115
14	62,0	85	69,0	105
15	59,0	60	75,0	115
16	58,0	80	73,5	110

Таблица 3

Влияние режимов термообработки (ТО) на физические характеристики поликарбоната

Условный номер режима	Теплостойкость по Вика, °С	Приведенная вязкость раствора	«Серебростойкость», с
Без ТО	151	0,61	7–10
1	151	–	Трещин нет
2	151	0,59	Трещин нет
3	151	0,60	Трещин нет
4	152	0,61	Трещин нет
5	151	–	Трещин нет
6	153	0,63	Трещин нет
7	151	0,59	Трещин нет
8	149	–	Трещин нет
9	150	0,59	Трещин нет
10	150	–	Трещин нет
11	152	0,61	Трещин нет
12	150	0,60	Трещин нет
13	150	–	Трещин нет
14	151	–	Трещин нет
15	152	–	Трещин нет
16	151	–	Трещин нет

Анализ значений механической прочности и деформационных свойств полимера показывает, что:

– на величину его ударной вязкости термообработка практически не оказывает влияния – значения ударной вязкости для всех образцов находятся в пределах 100–115 кДж/м²;

– значения предела прочности при растяжении остаются на уровне значений для исходного материала или чуть повышаются при низкотемпературном отжиге на воздухе (режимы 1 и 2), в глицерине (режимы 8 и 9) и в масле МС-20 (режимы 13 и 14).

Повышение температуры термообработки до 130–145°C или времени отжига до 6 ч (режимы 13 и 15) приводит к снижению механической прочности; закалка оказывает аналогичное влияние на прочность при растяжении поликарбоната;

– предел текучести при растяжении в процессе термообработки или остается на уровне исходного материала (при низкотемпературном отжиге), или резко возрастает (при увеличении времени выдержки и повышении температуры до 130–145°C), что свидетельствует о повышении жесткости материала;

– относительное удлинение при разрыве имеет наибольшие значения, т. е. в наибольшей мере проявляются вынужденно-эластические свойства материала, после низкотемпературной обработки на воздухе, в глицерине и в масле МС-20. Наиболее высокие и стабильные значения относительного удлинения при разрыве имеют образцы:

– после отжига в глицерине при 120°C в течение 1 ч (режим 9) и закалки (режим 5);

– после отжига при 100 и 120°C на воздухе (режимы 1 и 2);

– при 100°C – в глицерине (режим 8) и в масле МС-20 (режим 13);

– термообработка поликарбоната в глицерине с применением ультразвука приводит к значительному снижению прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве, а также к большому разбросу показателей, т. е. стабильность механических свойств материала в результате такой термообработки уменьшается;

– значения приведенной вязкости растворов термообработанного по различным режимам поликарбоната практически постоянны; так как приведенная вязкость растворов полимера характеризует его молекулярную массу, то можно заметить, что при термообработке по различным режимам практически не происходит изменения материала на молекулярном уровне. Принимая во внимание изменение механических свойств материала в процессе термообработки, можно предположить, что при термообработке происходят только структурные изменения надмолекулярного уровня, не затрагивая глобальных внутримолекулярных структур.

Сопоставляя результаты исследования поликарбоната после различных видов термообработки, следует констатировать, какие режимы положительно сказываются на физико-механических свойствах материала:

– низкотемпературный отжиг на воздухе при 100°C в течение 8 ч и при 120°C в течение 5 ч;

– отжиг в глицерине при 100°C в течение 5 ч и при 120°C в течение 1 ч;

– отжиг в масле МС-20 при 100°C в течение 6 ч и 120°C в течение 1 ч;

– закалка при -60°C после прогрева при 130°C в течение 2 ч.

Визуальный осмотр образцов поликарбоната показал, что в процессе термообработки при температуре 100–130°C (независимо от среды) внешний вид и размеры образцов практически не изменились. Термообработка (даже кратковременная) в течение 5–15 мин при температуре 145°C, близкой к температуре размягчения материала, вызывает коробление и потерю формоустойчивости образцов, а также резкое изменение размеров: 2–5% – по высоте и 4–9% – по длине образца.

Обобщая результаты исследования поликарбоната, можно сделать вывод о том, что оптимальным режимом термообработки следует считать отжиг:

– на воздухе при 120°C в течение 5 ч;

– в глицерине при 120°C в течение 1 ч;

– в масле МС-20 при 100°C в течение 6 ч.

Принимая во внимание трудности, которые могут возникнуть при промывке деталей после обработки их в масле МС-20, а в ряде случаев и просто невозможность применения такого отжига (в зависимости от назначения детали и условий ее эксплуатации), необходимо использовать следующие режимы:

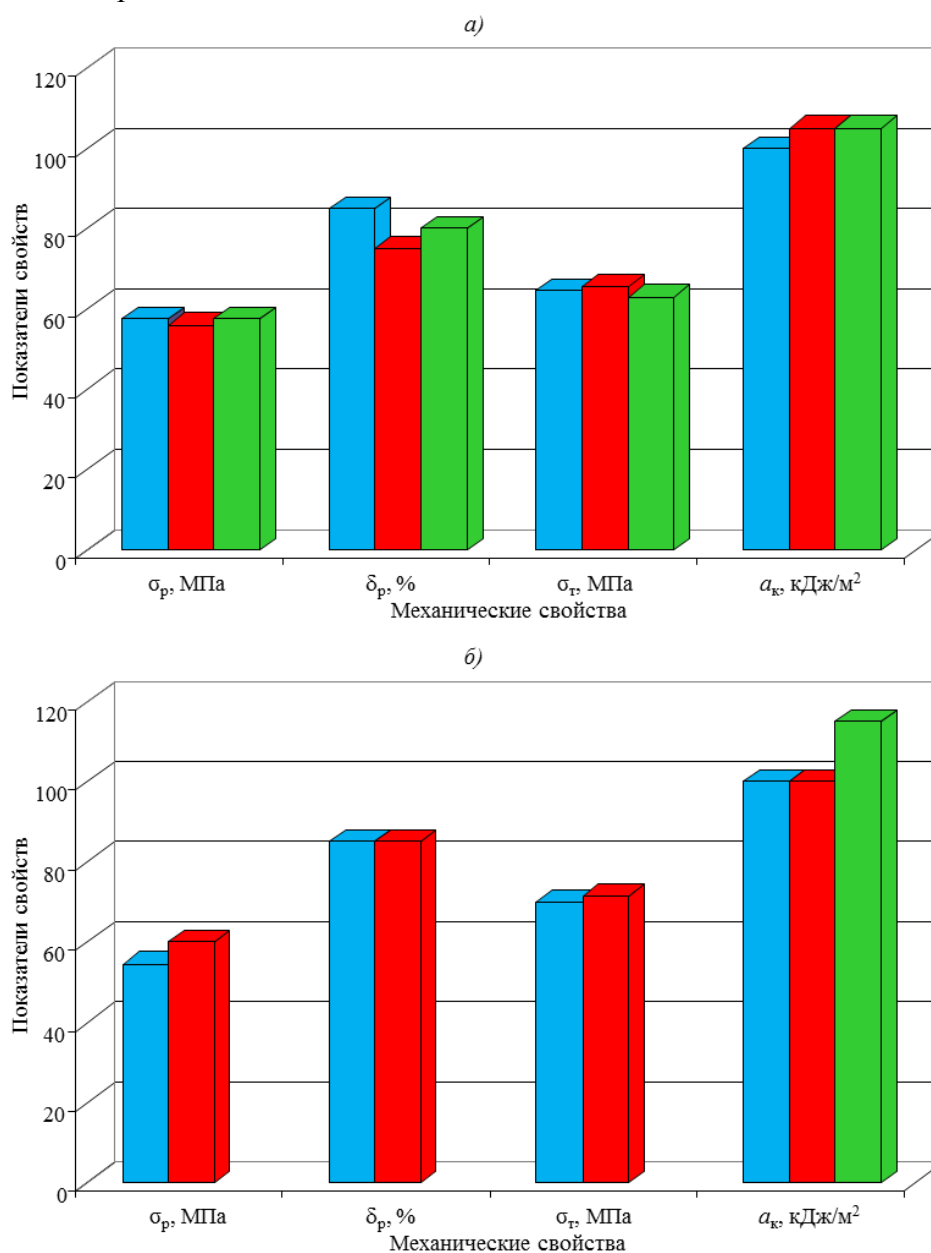
– отжиг на воздухе при температуре 120°C в течение 5 ч с последующим медленным охлаждением в термощкафу;

– отжиг в глицерине при температуре 120°C в течение 1 ч с последующим медленным охлаждением в термощкафу.

Вид термообработки (на воздухе или в глицерине) выбирается в зависимости от условий и возможностей конкретного производства.

Необходимость проведения термообработки устанавливается при отработке технологического процесса. Простые по конфигурации, тонкостенные, неответственного назначения детали можно не подвергать термообработке. Детали, работающие в области высоких температур, в поверхностно-активных средах, сложной конфигурации и имеющие металлическую арматуру, целесообразно подвергать термообработке.

Образцы поликарбоната, обработанные по оптимальным режимам, подвергали воздействию таких эксплуатационных факторов, как повышенная температура, влажность и атмосферное старение, после чего исследовали прочностные и деформационные свойства материала.



Свойства поликарбоната, термообработанного в глицерине (а) и на воздухе (б) при температуре 120°C в течение 1 (а) и 5 ч (б) в исходном состоянии (■) и после атмосферного старения в умеренно холодной климатической зоне в течение 1,5 мес на складе (■) и открытой площадке (■)

На рисунке приведены результаты испытания поликарбоната, термообработанного по рекомендуемым режимам, после атмосферного старения в умеренно холодной климатической зоне в течение 1,5 весенних месяцев. Видно, что механические свойства материала практически не изменились как при открытой экспозиции, так и при хранении в отапливаемом складе.

Обсуждение и заключения

Проведены исследования влияния различных режимов термообработки (16 вариантов) на свойства поликарбоната.

Установлено, что:

– независимо от режимов термообработки (среды, температуры, продолжительности выдержки) «серебростойкость» исследованных материалов в активной среде CCl_4 резко повышается – «серебростойкость» нетермообработанного поликарбоната составляет 7–10 с, термообработанные образцы в среде CCl_4 не растрескиваются;

– температура размягчения по Вика термообработанного поликарбоната остается на уровне значений нетермообработанного и составляет 149–152°C;

– значения приведенной вязкости разбавленных растворов поликарбоната после различных режимов термообработки остаются на уровне исходного значения нетермообработанного поликарбоната (0,60–0,61), что свидетельствует о том, что в материале не происходит изменений на молекулярном уровне;

– ударная вязкость термообработанных образцов остается на исходном уровне и составляет 100–115 кДж/м²;

– низкотемпературный отжиг при 100–120°C независимо от среды (воздух, глицерин, масло МС-20) практически не влияет на величину предела прочности при растяжении поликарбоната, повышение температуры отжига до 130–145°C вызывает снижение предела прочности при растяжении с 63,5 до 56,0–59,0 МПа;

– предел текучести при растяжении после различных видов термообработки повышается с 64,5 до 69,5–77,5 МПа;

– относительное удлинение при разрыве (наиболее чувствительная для поликарбоната характеристика) имеет наиболее высокие (80–90%) и стабильные значения после низкотемпературного отжига при 100–120°C по всем вариантам термообработки; повышение температуры термообработки до 130–145°C вызывает охрупчивание материала, которое сопровождается снижением относительного удлинения при разрыве до ~40%;

– при термообработке при температуре 100–120°C образцы из поликарбоната сохраняют хорошую размерную стабильность и формоустойчивость; при температуре 145°C происходит значительное изменение размеров и потеря формоустойчивости.

Таким образом, оптимальными режимами термообработки поликарбоната, позволяющими повысить качество изготавливаемых из него изделий (образцов), являются: отжиг на воздухе при температуре 120°C в течение 5 ч (режим 2) или отжиг в глицерине при температуре 120°C в течение 1 ч (режим 9).

Благодарности

Авторы выражают благодарность за помощь в работе Н.М. Абакумовой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садова А.Н., Кузнецова О.Н., Архиреев В.П. и др. Принципы управления качеством полимерной продукции. М.: КолосС, 2009. 319 с.
2. Старостина И.В., Додонова Р.Н., Полепкина Н.А. Контроль и управление качеством продукции // Материалы и технологии для авиационно-космической техники: сб. тез. докл. науч.-технич. конф. М.: ВИАМ, 2005. С. 5–12.

3. Орехов Н.Г., Старостина И.В. Анализ качества литой прутковой (шихтовой) заготовки из жаропрочных сплавов производства ФГУП «ВИАМ» // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №55. С. 23–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-23-30.
4. Петрова Г.Н., Старостина И.В., Румянцева Т.В. Исследование возможности маркировки деталей из поликарбоната // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №10 (46). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.02.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-11-11.
5. Сударушкин Ю.К., Гудимов М.М., Романов Д.С., Соколов М.Ю. Применение литевых поликарбонатов в авиаприборостроении // *Авиационная промышленность*. 2003. №2. С. 48–52.
6. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Старостина И.В. Литевые термопласты для изделий авиационной техники // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2016. №6. С. 10–15.
7. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д., Крыжановская Ю.В. Технические свойства полимерных материалов. СПб.: Профессия, 2005. 238 с.
8. Симонов-Емельянов И.Д., Юркин А.А., Суриков П.В. и др. Оценка эффективности действия реологических добавок при переработке поликарбоната // *Пластические массы*. 2015. №7–8. С. 37–40.
9. Каблов Е.Н. *Авиакосмическое материаловедение* // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2008. №3. С. 2–14.
10. Петрова Г.Н., Абакумова Н.М., Румянцева Т.В. и др. Пожаробезопасные литевые термопласты // *Пластические массы*. 2005. №1. С. 45–46.
11. Петрова Г.Н., Румянцева Т.В., Бейдер Э.Я. Влияние модифицирующих добавок на пожаробезопасные свойства и технологичность поликарбоната // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №6. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.07.2017).
12. Лазарева Т.К., Ермакин С.Н., Костягина В.А. Проблемы создания композиционных материалов на основе конструкционных термопластов // *Успехи в химии и химической технологии*. 2010. Т. 24. №4. С. 58–63.
13. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2011. С. 32–33.
14. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // *Интеллект и технологии*. 2015. №2 (11). С. 52–55.
15. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // *Редкие земли*. 2014. №3. С. 8–13.
16. Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Платонов М.М., Перфилова Д.Н. Термопластичные материалы нового поколения для авиации // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №5. С. 420–436. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-420-436.
17. Петрова Г.Н., Платонов М.М., Большаков В.А., Пономаренко С.А. Исследование комплекса характеристик базовых материалов для FDM технологии аддитивного синтеза. Физико-механические и теплофизические свойства // *Пластические массы*. 2016. №5–6. С. 53–58.
18. Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Сапего Ю.А., Платонов М.М. Реологические свойства термопластичной композиции на основе поликарбоната: зависимость от температуры переработки; влияние на механические характеристики и размерную стабильность объектов, созданных по FDM-технологии // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №4 (52). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.07.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-9-9.
19. Платонов М.М., Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Барботько С.Л. Оптимизация состава полимерной композиции с пониженной пожарной опасностью на основе поликарбоната для технологии 3D-печати расплавленной полимерной нитью // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2017. Т. 60. №1. С. 87–94.
20. Petrova G.N., Beider E.Ya. Construction materials based on reinforced thermoplastics *Chemistry and Materials Science* // *Russian Journal of General Chemistry*. 2011. Vol. 81. No. 5. P. 1001–1007.
21. Novakova-Marcincinova L., Novak-Marcincin J. Verification of mechanical properties of abs materials used in FDM rapid prototyping technology // *Proceedings in Manufacturing Systems*. 2016. Vol. 8. Is. 2. P. 87–92.

-
22. Смирнов О.И., Скородумов С.В. Моделирование технологии послойного синтеза при разработке изделий сложной формы // *Современные наукоемкие технологии*. 2010. №4. С. 83–87.
 23. Москатов К.А. Термическая обработка пластмассовых и резиновых деталей машин. М.: Машиностроение, 1976. 200 с.
 24. Кестельман Н.Я. Термическая обработка полимерных материалов в машиностроении. М.: Машиностроение, 1968. С. 170–201.
 25. Способ обработки изделий из поликарбоната: а. с. 804659; заявл. 19.04.79; опубл. 15.02.81.
 26. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.