

УДК 678.744.335

В.И. Постнов¹, М.В. Постнова¹, В.А. Богатов¹, С.В. Стрельников¹

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ НА СВОЙСТВА ОРГАНИЧЕСКИХ СТЕКОЛ

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-100-107

Рост объемов производства изделий из неметаллических материалов требует внедрения современных высокопроизводительных технологий. В связи с этим в данной статье рассмотрена возможность использования лазерного излучения для раскроя деталей из органических стекол, проведены сравнительные прочностные испытания образцов, полученных с помощью лазерного и механического раскроя, а также представлены результаты исследований по влиянию теплового излучения лазерной резки на остаточные напряжения в оргстекле, и в частности на его «серебростойкость».

Ключевые слова: оргстекло, «серебростойкость», лазер, остаточные напряжения, прочность, зона термического воздействия.

V.I. Postnov¹, M.V. Postnova¹, V.A. Bogatov¹, S.V. Strelnikov¹

INFLUENCE LASER ARE SHARP ON PROPERTIES PLEXIGLASSES

Growth of volumes of output of products from nonmetallic materials demands introduction in manufacture of products from them modern highly productive technologies. In this connection in the given work possibility of use of laser radiation for cutting details from organic glasses is considered, are spent comparative strength tests of samples received by means of laser and mechanical cutting. As results of researches on influence of thermal radiation laser beam cutting on residual pressure in plexiglass and in particular on it «silverfirmness» are resulted.

Keywords: plexiglass, «silverfirmness», the laser, residual pressure, durability, zone of thermal effect.

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

Одним из условий достижения нового конструктивно-технологического уровня развития авиационной техники уже в ближайшем будущем является использование при ее создании принципиально новых материалов и технологий их переработки [1–4].

Применение неметаллических материалов в авиационной промышленности позволило поднять самолетостроение на качественно новую ступень [5]: снизить массу конструкции, увеличить ресурс эксплуатации и уменьшить трудоемкость изготовления изделий. Рост объемов использования неметаллических материалов ставит вопрос и об освоении новых, более эффективных, способов их обработки. Однако до настоящего времени основным способом их обработки в массовом производстве пока остается механический, для которого характерны большие трудозатраты, многостадийность и потери материала в зоне реза, особенно при изготовлении деталей сложного контура.

В последние годы наметилась перспектива применения лазеров для резки материалов любой твердости. При этом обеспечиваются высокая точность и качество реза (малая ширина и параллельные кромки), небольшая зона нагрева, высокая производительность процесса и возможность точного, автоматизированного управления [6, 7]. Это обусловлено появлением достаточно мощных промышленных СО₂-лазеров и созданием на их основе автоматизированных трехкоординатных лазерных технологических комплексов [6, 8].

Процесс разделения материала лазерным излучением описывают следующими основными стадиями:

- поглощение света и последующая передача энергии внутрь материала;
- нагревание материала в зоне реза без разрушения;
- изменение агрегатного состояния вещества (испарение, плавление, сублимация, деструкция);
- удаление вещества из зоны реза;
- остывание материала после резки.

Каждую из этих стадий наблюдают при резке любого материала. В технологическом плане первые четыре стадии определяют производительность технологических операций; вторая и пятая – ответственны за структурные и химические превращения в материале; четвертая – влияет на качественные показатели процесса. Характерная продолжительность протекания каждой из этих стадий зависит от физико-химических свойств обрабатываемого материала, длины волны и плотности мощности лазерного излучения. Поэтому при разработке технологии лазерной раскройки конкретного материала важно изучить процессы, протекающие на каждой из этих стадий [9, 10].

Материалы и методы

При воздействии лазерного излучения на материал эффективность использования энергии лазерного пучка зависит от свойств поверхности материала, в частности от коэффициента отражения. Он представляет собой отношение интенсивностей отраженной световой волны и падающего светового пучка и определяется оптическими характеристиками материала и состоянием его поверхности. Однако на практике чаще используют термин «коэффициент поглощения», который характеризует поглощение материалом излучения с определенной длиной волны. В неметаллах взаимодействие лазерного излучения с материалом, сопровождающееся его деструкцией, носит сложный объемный характер. Поглотив энергию лазерного излучения, материал начинает нагреваться. Первоначально нагрев происходит в области поглощения света, определяемой глубиной проникновения излучения в среду l :

$$l = \alpha^{-1},$$

где α – коэффициент поглощения на данной длине волны.

С течением времени глубина прогрева увеличивается за счет теплопроводности:

$$l \sim (at)^{1/2},$$

где a – температуропроводность; t – продолжительность воздействия излучения на материал.

В зависимости от достигнутых температур различают резку в режиме плавления и резку в режиме испарения обрабатываемого материала. При резке неметаллов наиболее характерен режим испарения (деструкция). В обоих режимах для удаления материала из зоны реза применяют поддув вспомогательного газа. При резке неметаллических материалов для предотвращения их окисления в качестве вспомогательного газа используют инертные газы, азот, реже воздух.

Энергетические условия лазерной резки часто характеризуют с помощью ее удельной энергии, которая является характеристикой материала и не зависит от условий резки. Для органических стекол (оргстекло) она составляет $2 \text{ Дж/кг} \cdot 10^{-5}$. Зная удельную энергию резки, можно оценить режим резки материала [6]. Для оргстекло марок СО-120 и АО-120 толщиной 10 мм мощность лазера составляет 900 Вт, при этом скорость резки 3,5 м/мин.

Последствия взаимодействия лазерного излучения с веществом выражаются в формировании в материале так называемой зоны термического воздействия (ЗТВ), в которой в наружных к лазерному резу слоях наблюдается глубокая деструкция исходного материала.

Поэтому основные механические свойства материала зависят от степени совершенства структуры его поверхности. В этой связи при оптимизации режимов лазерной резки основным критерием должно быть минимальное нарушение структуры материала в ЗТВ.

Таким образом, оптимизация параметров лазерной технологии для конкретного производства требует решения комплекса чисто материаловедческих вопросов, связанных с диагностикой зоны термического воздействия, определением ее влияния на структурные, прочностные и другие характеристики материала.

Для исследования процессов лазерной резки органических стекол марок СО-120 и АО-120 использовали лазерную установку со следующими основными параметрами:

- длина волны излучения 10,6 мкм;
- мощность излучения 100–1500 Вт;
- характер излучения – непрерывный;
- расходимость излучения 1,5 мрад;
- состав излучения – одномодовый (*мода* TEM₀₀);
- предельная скорость резки 20 м/мин;
- вспомогательный газ – воздух, инертные газы.

Зону термического воздействия в оргстеклах изучали микроскопическим методом [11, 12], основанным на свойстве некоторых изотропных прозрачных материалов (включая ПММА – органическое стекло, или полиметилметакрилат) в напряженном состоянии становиться оптически анизотропными. Пучок поляризованного света, проходя через напряженный материал, разлагается на две составляющие, которые распространяются с разными скоростями. Возникающая оптическая разность хода лучей позволяет наблюдать напряженные участки в материале.

Образцы оргстекла, подвергнутые лазерной и механической обработкам, исследовали на «серебростойкость» [12]. Данный метод, используемый для оперативной оценки напряжений растяжений на поверхности обработанного материала, заключается в том, что существующие на поверхности напряжения растяжения легко обнаруживаются, если воздействовать на материал растворителем, в данном случае ацетоном. При этом на поверхности появляется «серебро», хорошо наблюдаемое под некоторым углом в проходящем свете.

Существует связь между величиной растягивающих напряжений σ_b (предел прочности при растяжении) и временем появления «серебра» t :

$$\lg t = \lg \theta - \gamma \log \sigma_b,$$

где θ и γ – константы, характеризующие материал и растворитель.

Для ПММА в ацетоне их значения равны: $\lg \theta = 14,26$; $\gamma = 1,89$ [12].

Испытаниям подвергали образцы различной толщины. Механическую обработку выполняли по ПИ1.2.А.487–97. Испытания на растяжение проводили в соответствии с ГОСТ 11262–80 на разрывной испытательной машине Zwick Roell Z050, испытания на ударную вязкость – в соответствии с ГОСТ 4647–80 на маятниковом копре МК-50. Скорость испытания на растяжение составляла: 10 мм/мин – для оргстекла марки АО-120 и 5 мм/мин – для марки СО-120. Энергию маятникового копра при испытаниях подбирали в диапазоне 20–80% от разрушающей нагрузки.

Результаты и обсуждение

Исследование образцов оргстекла, подвергнутых лазерной резке, показало, что зона термического воздействия в ПММА заметно отличается от ЗТВ в композиционных материалах – отсутствует зона коксообразования. Это хорошо согласуется с принятой классификацией полимерных материалов по характеру процессов, сопровождающих

взаимодействие материала с лазерным излучением [13–15]. Кромка реза в ПММА – оплавленная, и существует лишь зона термопластичности, имеющая достаточно резкую границу раздела с основным веществом. В обычном свете поверхность лазерного реза по цвету не отличается от основного материала.

В процессе лазерной резки оргстекло марок АО-120 и СО-120 толщиной 10 мм определено распределение температур в зоне реза, где d – диаметр распространяемого теплового поля от лазерного луча (рис. 1), и характер температурно-временного воздействия в определенных точках материала (рис. 2). Значения температур измеряли термопарами, «вживленными» в исследуемый образец на различной глубине от кромки реза.

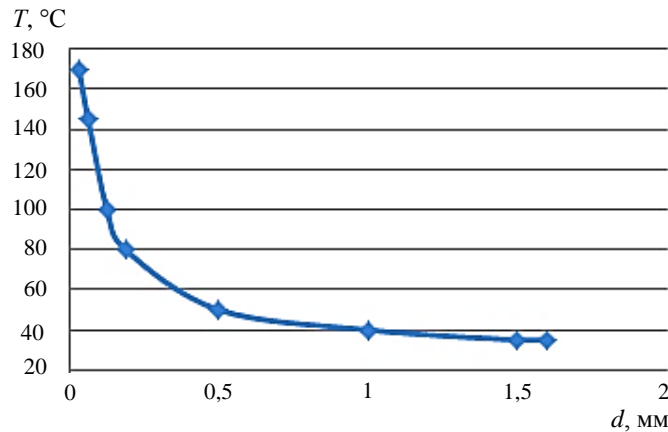


Рис. 1. Распределение температуры в ЗТВ для оргстекла

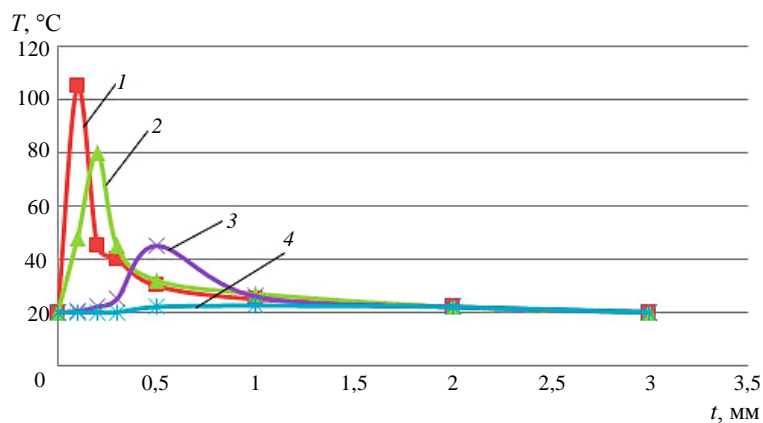


Рис. 2. Измерение температуры оргстекло АО-120 и СО-120 на различной глубине (t) от кромки реза: 1 – 0,5 мм; 2 – 1,0 мм; 3 – 1,87 мм; 4 – 2,37 мм

Из-за высоких скоростей нагрева и охлаждения материала, в зоне реза и ЗТВ формируются остаточные растягивающие напряжения. Геометрическую форму зоны термического воздействия в оргстеклах определяли микроскопическим исследованием шлифов образцов в проходящем поляризованном свете на микроскопе МБИ-15. Изготовленные обычным образом шлифы давали довольно четкую цветную картину с ярко выраженной границей расположения ЗТВ. Измерения позволили получить характерную глубину ЗТВ в органических стеклах, составляющую 0,28–0,33 мм, для образцов толщиной 10 мм при следующем режиме резки: мощность 850 Вт; скорость 1,7 м/мин; заглубление фокального пятна: 37% от толщины материала. Для образцов толщиной 3 мм глубина ЗТВ составила 0,14–0,17 мм при следующем режиме резки: мощность 200 Вт;

скорость 2 м/мин; заглубление фокального пятна: 25% от толщины материала. Различий в размерах ЗТВ в образцах стекол марок АО-120 и СО-120 не наблюдали.

В процессе сравнительных испытаний образцов из данных оргстекол отмечена особенность их поведения после резки лазером. Прочность образцов с течением времени снижалась и достигала 45% от первоначальной прочности, которая, в свою очередь, несмотря на большие значения растягивающих напряжений в зоне реза, практически не отличалась от прочности отфрезерованных образцов (рис. 3).

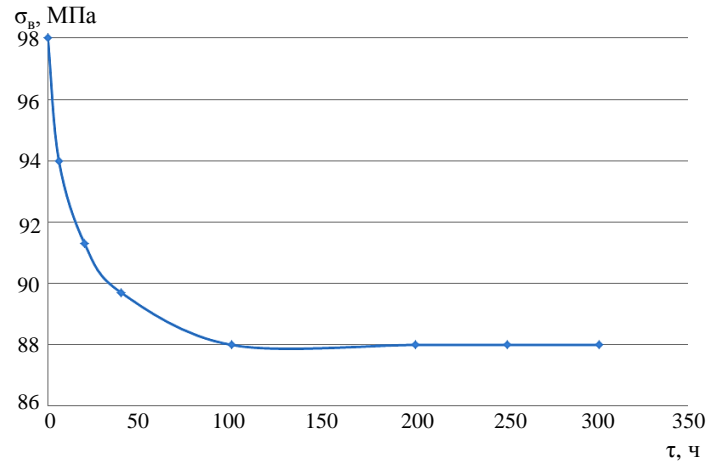


Рис. 3. Зависимость прочности при растяжении оргстекол АО-120 и СО-120 от продолжительности выдержки после лазерной резки

Релаксация напряжений во время выдержки оргстекол АО-120 и СО-120 после лазерной резки происходит по сложному механизму, так как процесс релаксации зависит от большого количества факторов, которые трудно учесть (содержание мономера; степень разветвленности макромолекул, стереорегулярности; условия выдержки, степень влажности, значения температуры и др.).

Определение «серебростойкости» образцов оргстекол АО-120 и СО-120 после лазерной резки показало, что в широком диапазоне ее режимов данное явление возникло спустя 2–3 с после обработки ацетоном. Следует отметить, что для ПММА допустимым для эксплуатации является появление «серебра» более чем на 3 мин [12].

В термопластичных материалах существующие напряжения со временем релаксируют. Эта закономерность хорошо видна на рис. 4.

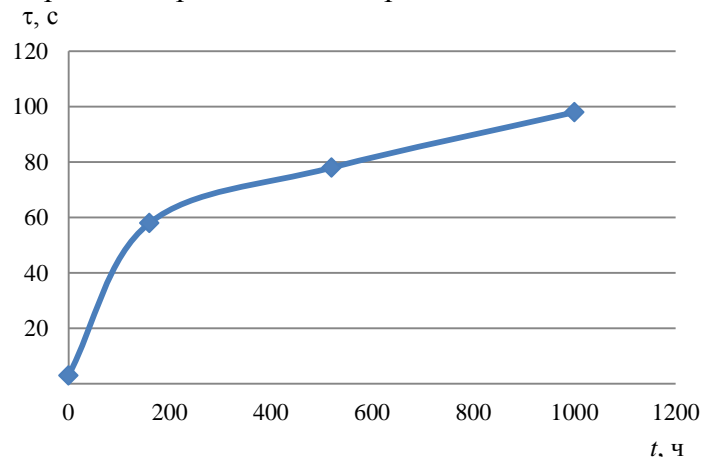


Рис. 4. Зависимость «серебростойкости» от продолжительности выдержки образцов оргстекла марки АО-120 толщиной 10 мм при комнатной температуре

С повышением температуры термообработки органических стекол процессы релаксации в них ускоряются. Так, отжиг оргстекла марки СО-120 при температуре 90 ± 5 °С, а марки АО-120 при температуре 80 ± 5 °С в течение 6 ч привел к увеличению параметра «серебростойкость» до 6 мин, что свидетельствует о значительном уменьшении существовавших напряжений в ЗТВ. Однако шлифы, изготовленные из отожженных образцов, показали, что зона оптической анизотропии в органических стеклах сохраняется практически без изменения.

Для определения механических свойств органических стекол исследовали образцы, изготовленные лазерной резкой и фрезерованием. Данные проведенных испытаний приведены в табл. 1–4.

Таблица 1

Прочность при разрыве оргстекла марки СО-120 после различных видов обработки

Тип образца	Вид обработки	Толщина образца, мм	Прочность при разрыве, МПа	Коэффициент вариации, %
I	Механическая	9,3	54,5	1,2
	Лазерная	9,6	27,6	2,3
II	Механическая	9,0	73,9	3,1
	Лазерная	9,0	43,5	2,2
III	Механическая	9,3	54,5	4,8
	Лазерная	9,6	27,2	1,9

Таблица 2

Ударная вязкость оргстекла марки СО-120 после различных видов обработки

Тип образца	Вид обработки	Толщина образца, мм	Ударная вязкость, кДж/м ²	Коэффициент вариации, %
I	Механическая	8,9	16,7	1,3
	Лазерная	8,9	13,5	2,8
II	Механическая	8,9	15,2	3,2
	Лазерная	8,9	10,7	2,4
III	Механическая	8,9	12,6	4,6
	Лазерная	8,9	7,5	3,1

Таблица 3

Прочность при растяжении оргстекла марки АО-120 после различных видов обработки

Тип образца	Вид обработки	Толщина образца, мм	Прочность при растяжении, МПа	Коэффициент вариации, %
I	Механическая	2,8	85,9	1,4
		4,1	88,2	2,3
		10,1	81,7	0,8
	Лазерная	3,2	80,3	3,4
		4,6	64,1	1,2
		10,3	44,1	2,9
II	Механическая	3,0	89,2	0,8
		4,2	84,6	1,3
		10,1	93,0	3,4
	Лазерная	3,2	86,5	0,9
		4,3	72,8	4,8
		10,3	62,0	3,1
III	Механическая	2,8	80,1	1,1
		4,2	87,3	6,8
		10,1	87,1	4,2
	Лазерная	3,1	81,1	1,3
		4,2	83,7	2,8
		10,1	71,6	3,2

**Ударная вязкость оргстекла марки АО-120 по Шарпи
после различных видов обработки**

Тип образца	Вид обработки	Толщина образца, мм	Ударная вязкость, кДж/м ²	Коэффициент вариации, %
II	Механическая	2,9	30,5	3,8
		4,2	24,8	5,2
		10,0	31,9	6,8
	Лазерная	2,9	21,9	4,1
		4,5	12,1	7,2
		10,0	23,1	3,3
III	Механическая	3,0	29,4	1,3
		4,2	21,9	2,8
		10,0	21,4	4,0
	Лазерная	3,1	20,5	2,1
		4,7	11,3	5,8
		10,4	11,5	4,0

Испытания показали, что прочность при разрыве образцов органического стекла, полученных фрезерованием, выше на 30–45% прочности образцов, полученных лазерной резкой. Поверхность лазерного реза оргстекла – гладкая, оплавленная, но с небольшой периодической волнистостью (размер впадин – до 0,2 мм). В отличие от лазерной резки, поверхность образцов после механической обработки – шершавая, в отдельных местах со сколами на кромках реза. Однако прочность этих образцов оказалась выше. Причем с увеличением толщины образца его прочность после лазерной резки уменьшалась, т. е. чем продолжительнее было воздействие лазерного излучения, тем большее влияние оно оказывало на прочность образца.

Отличалось и «поведение» образцов при испытании. В образцах, полученных лазерной резкой, практически сразу после приложения нагрузки в оплавленном слое появлялся ряд трещин, одна из которых при дальнейшем нагружении развивалась и приводила к разрушению, в то время как в образцах, полученных механической обработкой, явление раннего трещинообразования не наблюдали. При учете обнаруженных больших остаточных напряжений растяжения в зоне термического воздействия при испытании на «серебростойкость» проведена серия испытаний отожженных образцов органических стекол.

Первоначально отжиг образцов оргстекла марки СО-120 проведен в соответствии с ПИ1.2.А.487–97 при температуре 85 ± 5 °С в течение 6 ч. Последующие испытания при растяжении показали (табл. 5), что прочность отожженных образцов практически не изменилась, хотя «серебростойкость» возросла до 3 мин. Другая партия образцов подвергалась более глубокой термообработке при температуре 140 ± 5 °С в течение 3 ч. В данном случае прочность образцов резко возросла, приблизившись к прочности образцов, полученных механической обработкой.

Таблица 5

Прочность при растяжении оргстекла марки СО-120 после термической обработки

Тип образца	Вид обработки	Толщина образца, мм	Прочность при разрыве, МПа	Коэффициент вариации, %
II	Лазерная резка	9,0	43,5	3,7
	Лазерная резка с отжигом при 140 ± 5 °С в течение 3 ч	9,0	63,4	3,9
	Механическая	9,0	70,4	4,2
II	Лазерная резка	10,1	44,5	2,1
	Лазерная резка с отжигом при 85 ± 5 °С в течение 6 ч	10,1	45,1	2,3
	Механическая	10,1	73,9	3,1

Заключения

Применение раскроя оргстекло с использованием лазерной резки позволяет снизить коэффициент использования материала (КИМ) на 10–15%, а трудоемкость – на 30–40% по сравнению с традиционной механической обработкой (распил, фрезерование) заготовок и деталей.

Таким образом, учитывая положительную тенденцию к повышению прочностных свойств оргстекло марки СО-120 за счет оптимизации температурно-временных режимов их обработки после лазерной резки, возможно полностью релаксировать напряжения в зонах термического воздействия с обеспечением в них необходимых механических свойств. Данная технология раскроя оргстекло марок СО-120 и АО-120 может быть использована для изготовления заготовок с последующей механической доработкой в размер изделия.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект & Технологии. 2016. №2. С. 41–46.
2. 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.
3. Подживотов Н.Ю., Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ерасов В.С., Серебренникова Н.Ю., Абдуллин М.Р., Лимонин М.В. Слоистые металлополимерные материалы в элементах конструкции воздушных судов // Перспективные материалы. 2016. №10. С. 5–19.
4. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // Авиационные материалы и технологии. 2017. №8. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
5. Сентюрин Е.Г., Мекалина И.В., Айзатулина М.К., Исаенкова Ю.А. История создания материалов самолетного остекления и полимерных материалов со специальными свойствами (к 75-летию лаборатории полимерных материалов со специальными свойствами) // Авиационные материалы и технологии. 2017. №3 (48). С. 81–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-81-86.
6. Григорянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
7. Постнов В.И., Постнова М.В. Механика процессов резки полимерных материалов лазером // Механика и процессы управления: сб. науч. тр. / Ульяновский гос. техн. ун-т. Ульяновск: УлГТУ, 2000. С. 64–70.
8. Виноградов Б.А., Гавриленко В.Н., Ли Бенсон М.Н. Теоретические основы воздействия лазерного излучения на материалы. Благовещенск: БПИ, 1993. 344 с.
9. Голубенко Ю.В., Бондарев А.В., Пономаренко К.В. Лазерная резка полимеров и неметаллических композиционных материалов // Технология машиностроения. 2005. №10. С. 57–59.
10. Постнов В.И., Постнова М.В., Постнов А.В. Исследование параметров лазерной резки препрегов из органоткани // Сборник материалов III Всерос. науч.-практ. конф. «Современные технологии в машиностроении». Пенза: Приволжский дом знаний, 2000. С. 35–38.
11. Харитонов Г.М., Яковлев Н.О., Мекалина И.В. Влияние физико-механических характеристик оргстекло на напряжения в самолетном остеклении при аэродинамическом нагреве // Авиационные материалы и технологии. 2015. №S1. С. 56–60. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-56-60.
12. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов: справочное пособие: в 3 т. / под ред. А.Т. Туманова. М.: Машиностроение, 1973. Т. 3: Методы исследования неметаллических материалов. 146 с.
13. Аксеева Р.М., Зайкова Г.Е. Горение полимерных материалов. М.: Наука, 1981. 280 с.
14. Халтуринский Н.А., Берлин А.А. Закономерности макрокинетики пиролиза полимеров // Успехи химии. 1983. Т. 52. №12. С. 2819–2838.
15. Асеева Р.М., Смуткина З.С., Берлин А.А., Касаточкин В.И. О термических превращениях карбо- и гетероцепных полимеров // Структурная химия углерода и углей. М.: Наука, 1969. С. 161–200.