

УДК 628.9.041.678

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771332017104268>

О. П. Роменская¹, инженер, Т. А. Манько², профессор, д. т. н.,
И. А. Гусарова³, начальник отдела, к. т. н.,
А. А. Самусенко⁴, начальник лаборатории

РАЗРАБОТКА ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО НАГРЕВА УГЛЕПЛАСТИКОВ В ПРОЦЕССЕ НАМОТКИ

En

The production of composite material based on carbon fiber and epoxy binder of improved quality with high strength and stable physical and mechanical characteristics is considered in the article.

For the production of composites a device for the remote heating of carbon plastics in the winding process has been developed. The use of this device contributes to a significant improvement in the wettability of the filler fibers facilitating the penetration of the binder into the interfiber space of the fibrous filler.

Designing a device for the carbon plastics remote heating in the winding process, the optical properties of the researched materials are taken into account.

To determine the optical properties of these materials (fillers, binders and carbon plastic based on them), the infrared transmission spectra of the liquid and solidified binder were fixed.

A qualitative analysis of the cured epoxy binder samples was carried out using Nicoletis5 infra-red spectrometer equipped with an impaired total internal reflection attachment and a transmittance module.

Halogen incandescent lamps are used as a heater, the main part of the radiated energy is in the spectral region $(1 - 3) \times 10^{-6}$ m.

To confirm the efficiency of the device for the remote heating of carbon fiber reinforced plastics samples of CFRP based on high-strength carbon fiber and binder were fabricated and tested for the strength of the material in interlayer shear.

The shear strength of samples manufactured using infrared heating is 20% higher than for those prepared by convection heating.

In addition, the samples obtained using infrared heating have stable mechanical characteristics with a significant reduction in curing time, which is important for the production process as a whole (it is possible to reduce the curing time of the product by 30-40%).

Ua

На даний час у ракетно-космічній техніці широке застосування отримали вуглепластики. За існуючої технології формоутворення виробів із вуглепластиків здійснюється конвективним нагрівом, який є тривалим і трудомістким процесом, вимагає значних витрат електроенергії і великих виробничих площ. Пошук шляхів щодо удосконалення існуючих технологій призвели до використання нагріву у процесі виготовлення виробів.

Нагрівання у процесі виготовлення забезпечує постійну температуру зв'яз-

¹Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» имени М. К Янгеля

²Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

³Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» имени М. К Янгеля

⁴Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» имени М. К Янгеля

зуючого протягом усього процесу намотування, тим самим дозволяє скоротити цикл виготовлення виробів, знизити трудомісткість процесу і підвищити експлуатаційні характеристики матеріалу.

Застосування інфрачервоного нагріву під час намотування виробів із ПКМ дозволяє інтенсифікувати технологічний процес виготовлення виробів, знизити трудомісткість процесу і підвищити експлуатаційні характеристики матеріалу. Можливість застосування інфрачервоного нагріву у технологічному процесі отримання вуглепластиків конструкційного призначення під час значної інтенсифікації процесу затвердіння для виробів ракетно-космічної техніки є досить актуальним (для України як космічної держави) у разі сучасного виробництва виробів із композиційних матеріалів.

Вступление

К полимерным композиционным материалам (ПКМ), получившим в настоящее время широкое применение, относятся углепластики - полимерные композиционные материалы, армированные углеродными волокнами. Эти материалы обладают высокой прочностью, жёсткостью и малой массой, часто прочнее стали, но гораздо легче. По удельным характеристикам превосходят высокопрочную сталь, например, легированную конструкционную сталь 25ХГСА. Полимерные композиты широко используют в ракетно-космической технике, строительстве, судостроении, радиоэлектронике, производстве бытовых предметов, спортивного инвентаря и др. В зависимости от назначения к создаваемым конструкциям предъявляются требования по высокой точности геометрических параметров и стабильности прочностных характеристик. Указанные требования решаются на этапе проектных проработок за счёт выбора оптимальных конструктивно-технологических решений и применения современных материалов с высокими удельными характеристиками по прочности и жёсткости.

При разработке оптимального технологического режима изготовления композиционных конструкций методом намотки учитываются такие факторы как температура связующего, смачиваемость волокон, натяжение жгута, а также конструктивные особенности пропиточно-натяжного тракта намоточного станка.

Для обеспечения пропитки волокнистого наполнителя жидким связующим производится подогрев связующего непосредственно в пропитывающей ванне до 40°С. Подогрев связующего снижает его вязкость, улучшает смачиваемость волокон и процесс пропитки.

Постановка задачи

В работе предлагается использование приспособления для дистанционного нагрева углепластиков в процессе намотки для обеспечения постоянной температуры связующего.

Исследование свойств связующего (жидкого и отвержденного)

В процессе намотки после выхода углеродного жгута из ванны связующее остывает и при завершении оборота жгута вокруг оправки его температура значительно уменьшается и следующий слой жгута наматывается на слой, в котором связующее уже остыло и имеет большую вязкость, чем нужно для получения плотной структуры материала. Поэтому необходимо обеспечить постоянную температуру связующего на протяжении всего процесса намотки.

В работе использовали эпоксидное трёхкомпонентное связующее *Araldite LY 1135-1 A/Aradur 917 CH/Accelerator 960-1* производства компании *Huntsman* (далее *Huntsman*). Согласно паспорта связующее обладает самой низкой вязкостью (лучшими пропитывающими свойствами и смачиваемостью) при температуре 80°C .

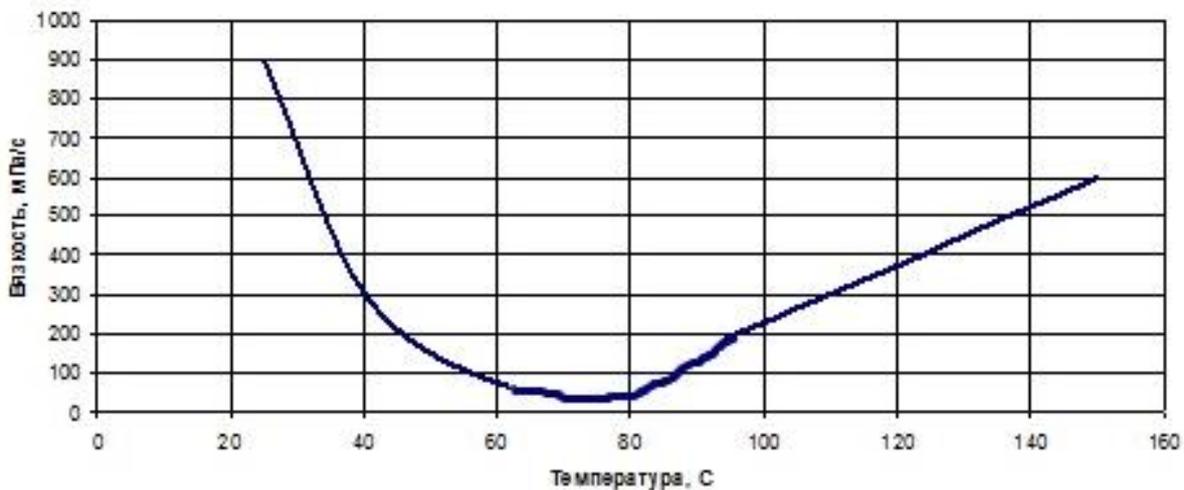


Рис. 1. График зависимости вязкости связующего *Huntsman* от температуры

Для обеспечения постоянной температуры связующего при намотке сформированный слой предлагается подогревать с помощью инфракрасного (ИК) нагревателя.

Основным принципом действия ИК нагревателей является преобразование электрической энергии в тепловое излучение. Тепловая энергия от инфракрасных нагревателей не поглощается воздухом, поэтому все тепло от нагревателя практически без потерь достигает поверхности конструкции в зоне его действия и греет именно ее, а не воздух. При этом длины волн, излучаемые конструкцией, зависят от температуры нагревания - чем выше температура, тем короче длина волны и выше интенсивность излучения.

Инфракрасное излучение это практически то же, что и обычный свет. Единственное отличие заключается в том, что при попадании на предметы

видимая часть спектра становится освещением, а инфракрасное излучение поглощается телом, превращаясь при этом в энергию тепла.

Передача тепла от инфракрасных обогревателей предметам происходит мгновенно, так как ИК излучение испускает возбуждённые атомы или ионы, что приводит к увеличению энергии излучения.

Сдвиг максимума интенсивности излучения (r) влево с повышением температуры иллюстрирует рис. 2.

При проектировании приспособления для дистанционного нагрева углепластиков в процессе намотки учитывали оптические свойства исследуемых материалов.

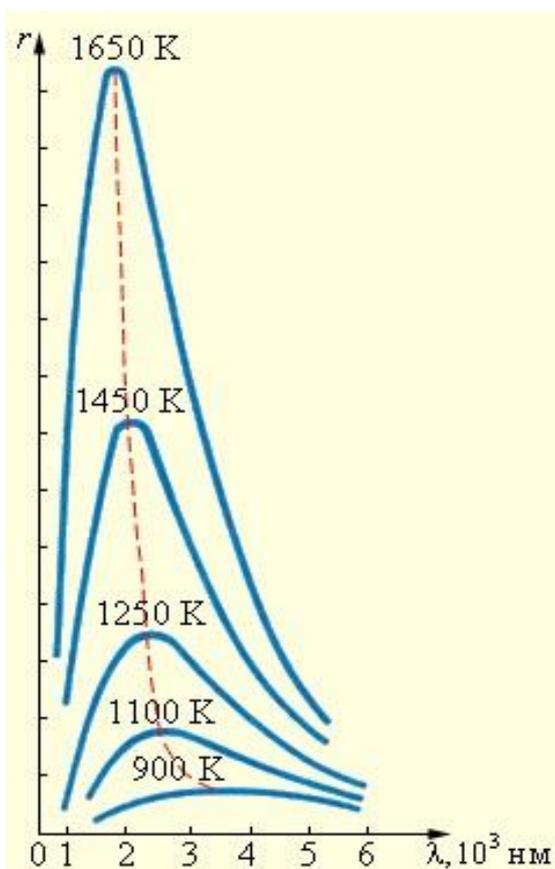


Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения от длины волны

Для определения оптических свойств этих материалов (наполнителей, связующих и углепластика на их основе) снимали ИК спектры пропускания жидкого и отвержденного связующего. Исследованиям подвергались образцы эпоксидного связующего *Huntsman*:

1. Неотверждённое эпоксидное связующее *Huntsman*;
2. Отверждённое в печи эпоксидное связующее *Huntsman*;
3. Отверждённое ИК нагревом эпоксидное связующее *Huntsman*.

Свойства неотверждённого эпоксидного связующего представлены в табл. 1.

Таблиця 1.

Свойства неотверждённого эпоксидного связующего *Huntsman*

Свойства	Показатели	
	[°C]	[МПа/с]
Исходная вязкость смеси (по Хопплеру, <i>ISO 12058-1b</i>)	25	600-1000
	40	200-300
	80	<75
Свойства	[°C]	[мин]
Время застывания	80	52-60
	100	10-15
	110	5-8
	120	3-5
	130	1,5-3
	140	1-2

Подготовка образцов отверждённых эпоксидных связующих включает в себя следующие этапы:

- нанесение небольшого количества неотверждённого эпоксидного связующего на фторопластовую плёнку в виде капли;
- отверждение подготовленных образцов двумя способами:
 - в печи, с равномерным нагревом по режиму от $+15^{\circ}\text{C}$ до $+120^{\circ}\text{C}$ в течении 20 минут, выдержка 1 час при температуре 120°C ;
 - ИК-нагрев лампой *Meniksq-1200* (250 Вт) от температуры $+15^{\circ}\text{C}$ до $110\pm 3^{\circ}\text{C}$ в течении 20 минут, выдержка 1 час при температуре $110\pm 3^{\circ}\text{C}$. (рис. 3).

Рис. 3. Иллюстрация ИК нагрева лампой *Meniksq-1200* (250 Вт)

Режимы полимеризации приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Режим полимеризации эпоксидных связующих

Нагрев в печи		ИК-нагрев	
Время, ч	Температура, °C	Время, ч	Температура, °C
10:30	15	10:30	15
10:35	42	10:35	75
10:38	73	10:38	89
10:41	89	10:41	96
10:44	97	10:44	104
10:47	109	10:47	107
10:50	120	10:50	111
10:53	126	10:53	111
10:55	122	10:55	110
10:58	120	10:58	112
11:02	121	11:02	111
11:20	122	11:20	112
11:50	120	11:50	117

Качественный анализ образцов отверждённого эпоксидного связующего марки *Huntsman* проводили с помощью ИК Фурье-спектрометра *Nicoletis5* с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения и модулем пропускания.

Проба жидкого связующего растворялась в хлористом метиле, капля раствора с помощью капилляра помещалась на стекло из селенида цинка и выдерживалась до испарения растворителя.

Образцы спектра, снятые с неотверждённого и отверждённого эпоксидного связующего марки *Huntsman* показаны на рис. 4.

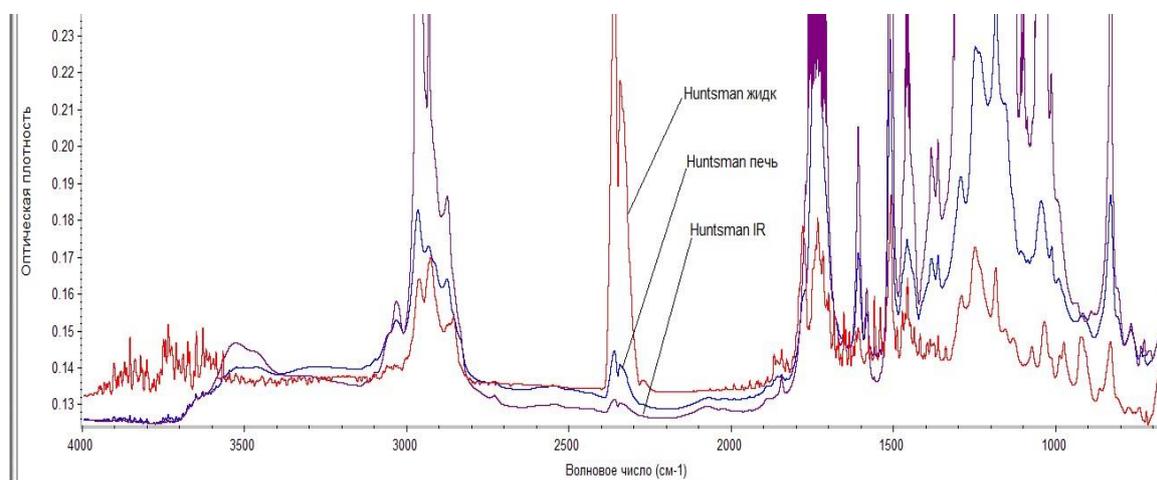


Рис. 4. Спектры пропускания связующего

Как видно на рис. 4, пропускная способность отвержденной с помощью ИК нагрева смолы выше, чем отвержденной в печи. Это свидетельствует о более высокой степени полимеризации связующего при использовании ИК нагрева.

ИК излучение поглощается в диапазоне длин волн $1000..3000 \text{ см}^{-1}$.

После проработки справочной и рекламной литературы в качестве нагревателя были выбраны галогенные лампы накаливания, основная часть излучаемой энергии которых приходится на спектральную область $(1..3) \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Для обеспечения равномерного нагрева была рассчитана система расположения источников ИК нагрева с заданной плотностью облучения. Поверхностная плотность излучения с единицы тела накаливания на два порядка больше, чем с поверхности оболочки. Поэтому при расчете энергетической облученности в любой точке пространства вокруг трубчатых ламп выбранного типа учитывалась облученность, создаваемая только телом накаливания. Погрешность расчета при этом не превышала 1-2%.

Установлено, что увеличение расстояния от лампы приводит к уменьшению значений облученности объекта, и, как следствие, к уменьшению температуры нагрева, и, одновременно, к более равномерному его облучению. При облучении одиночной лампой облученность объекта составляла наибольшее значение в середине поля и совпадала в поперечном и продольном направлениях. Достижение близкой к равномерной облученности на значительной площади обеспечивалось соединением нескольких ламп в группу. При совместном действии группы излучателей в результате суммирования кривых распределения энергии создается равномерное поле излучения, при этом облученность увеличивается почти в два раза по сравнению с одиночным излучателем. Изменение значений величины облученности достигается также регулировкой питающего напряжения.

Были рассмотрены поля излучения системы из трех ламп, расположенных на разных расстояниях друг от друга и на различной высоте облучаемого объекта.

На рис. 5 и рис. 6 приведены результаты определения отражения отдельных полей излучения в общее поле для двух случаев взаимного расположения ламп и объекта.

Как следует из представленных результатов отражения, энергетическая облученность по мере удаления от середины поля падает и в случае группы излучателей. Самым экономичным путем преодоления «краевого эффекта» является расположение отражателей в непосредственной близости к внешним излучателям. Это приводит к перераспределению отраженного излучения на края облучаемого материала. Применение отражателей обеспечивает создание необходимой степени равномерности поля облучения и увеличение значений облученности объекта.

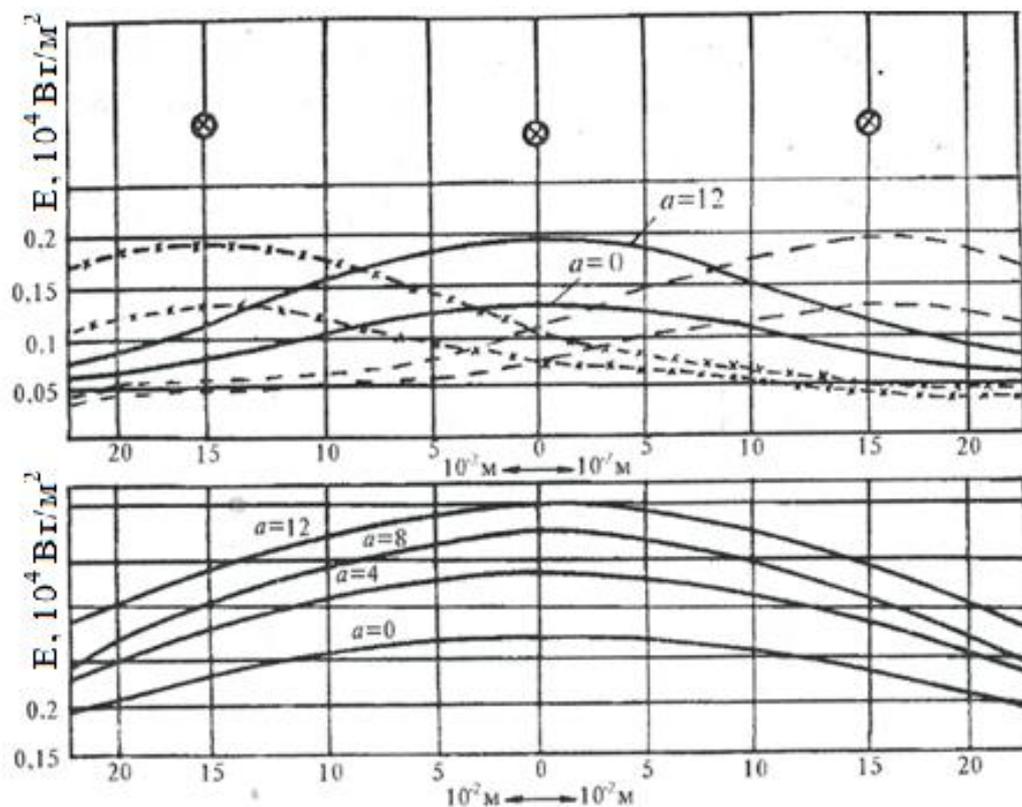


Рис. 5. Продольное сечение поля излучения трех ламп НИК 220-1000 ($b=16 \cdot 10^{-2}$ м, $h=20 \cdot 10^{-2}$ м)

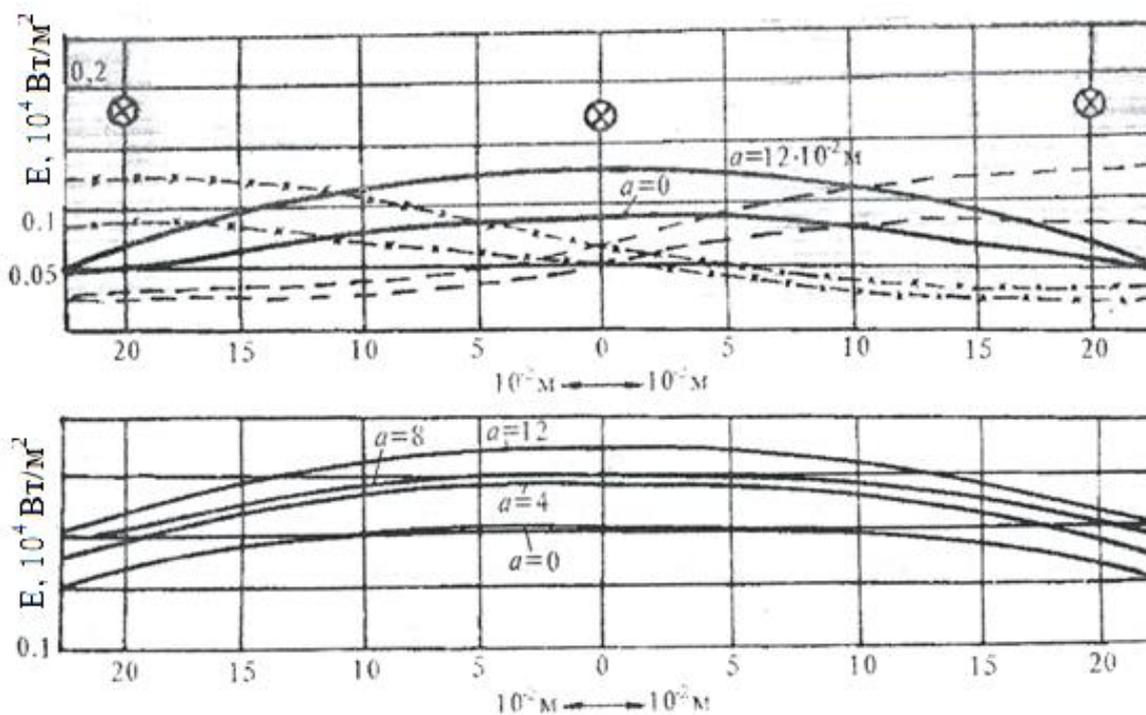


Рис. 6. Продольное сечение поля излучения трех ламп НИК 220-1000 ($b=20 \cdot 10^{-2}$ м, $h=25 \cdot 10^{-2}$ м)

При проектировании приспособления для дистанционного нагрева углепластиков в процессе намотки был выбран отражатель с U -образным профилем, обеспечивающий высокую равномерность облучения в объеме за счет многократных переотражений излучения галогеновых ламп накаливания (ГЛН). Галогенная лампа – это трубка, наполненная разреженными парами галогена, которые под воздействием создаваемого в ней электрического поля излучают свет и ИК-излучение. Внутри этих ламп создается вакуум и помещается нить из вольфрама или специального углеволокна, нагревающаяся при пропускании электрического тока.

Отражатель с U -образным профилем увеличивает облучение по сравнению с облучением без отражателя примерно в 1,8 раза. При высоте от объекта облучения до ламп $h = 10 \cdot 10^{-2}$ м и расстоянии между лампами $b = 4 \cdot 10^{-2}$ м в центре поля облученность имеет значение $E_0 = 0,69 \cdot 10^4$ Вт/м² Вт/м², а на краях $E_K = 0,46 \cdot 10^4$ Вт/м².

Экспериментально установлено, что плотность облучения $E_0 = 0,51 \cdot 10^4$ Вт/м² достигается при наличии отражателя, расстоянии $b = 4 \cdot 10^{-2}$ м и высотой ламп над нагреваемой поверхностью $h = 25 \cdot 10^{-2}$ м при напряжении на лампах $U = 220$ В.

Были выбраны основные параметры приспособления для нагрева углепластиков в процессе намотки инфракрасными источниками нагрева (рис. 7).

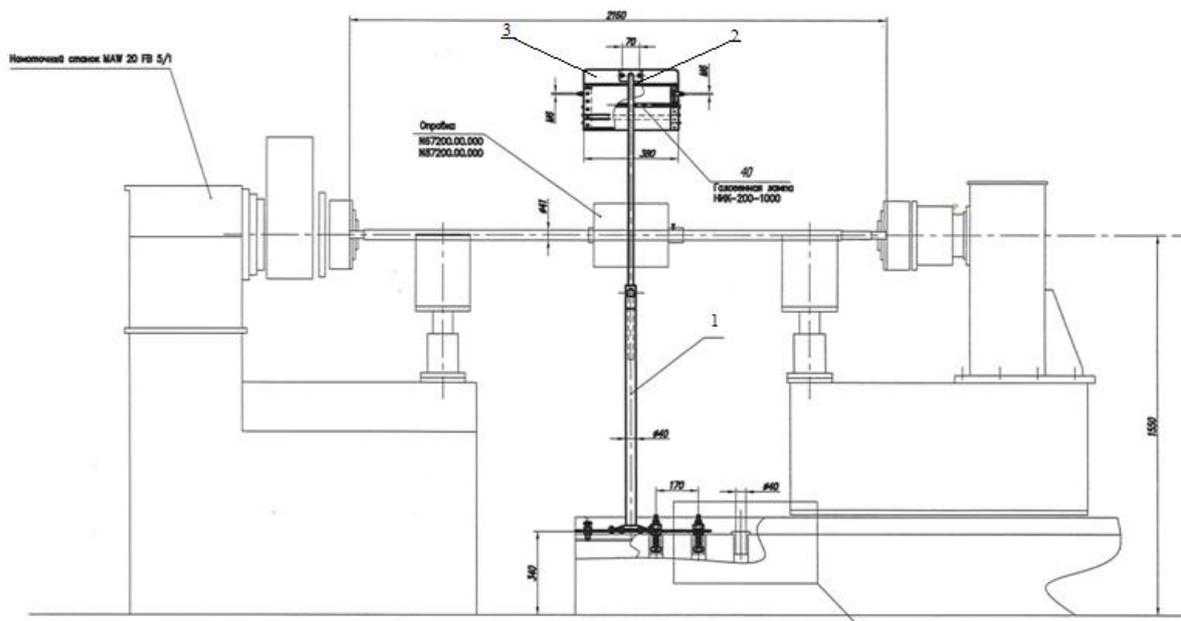


Рис. 7. Чертеж приспособления для дистанционного нагрева углепластиков в процессе изготовления

Приспособление состоит из стойки (1), к которой прикреплен корпус (2) и отражатель (3), обеспечивающий высокую равномерность облучения

за счет многократных переотражений ИК-излучения. Тип поверхности и ее состояние могут значительно влиять на процесс излучения или поглощения тепла, особенно на открытом воздухе. В качестве материала отражателя был выбран лист меди (коэффициент отражения равен 0,03 ... 0,05). Излучательная способность металлов увеличивается с увеличением электропроводности. Медь имеет наибольшую электропроводность среди металлов (электропроводность меди равна 94 см). Так как излучательная способность поверхности зависит от материала и его шероховатости, поверхность отражателя была отполирована до 14 квалитета. Под отражателем были установлены ГЛН типа НИК-220-1000 (4), которые располагались параллельно друг другу для обеспечения равномерного температурного поля.

Установка рассчитана на количество ламп от 1 до 3. Расстояние между лампами составляет $4 \cdot 10^{-2}$ м. Расстояние от ламп к отражателю $10 \cdot 10^2$ м.

Конструкция установки предусматривает возможность перемещения нагревателя в вертикальном направлении. Напряжение на лампах регулируется трансформатором.

Регулирование температуры в зоне намотки осуществлялось изменением расстояния источника ИК нагрева до поверхности оправки. Измерение температуры в зоне намотки осуществлялось тепловизором и дублировалось термопарами.



Рис. 8. Фото процесса измерения температуры

Физико-механические характеристики углепластика, нагретого ИК излучением во время намотки

С целью подтверждения работоспособности приспособления для дистанционного нагрева углепластиков были изготовлены образцы углепластика на основе высокопрочного углеродного волокна и связующего Huntsman, которые прошли испытания на определение прочности материала при межслойном сдвиге ($\sigma_{\text{сдв}}$).

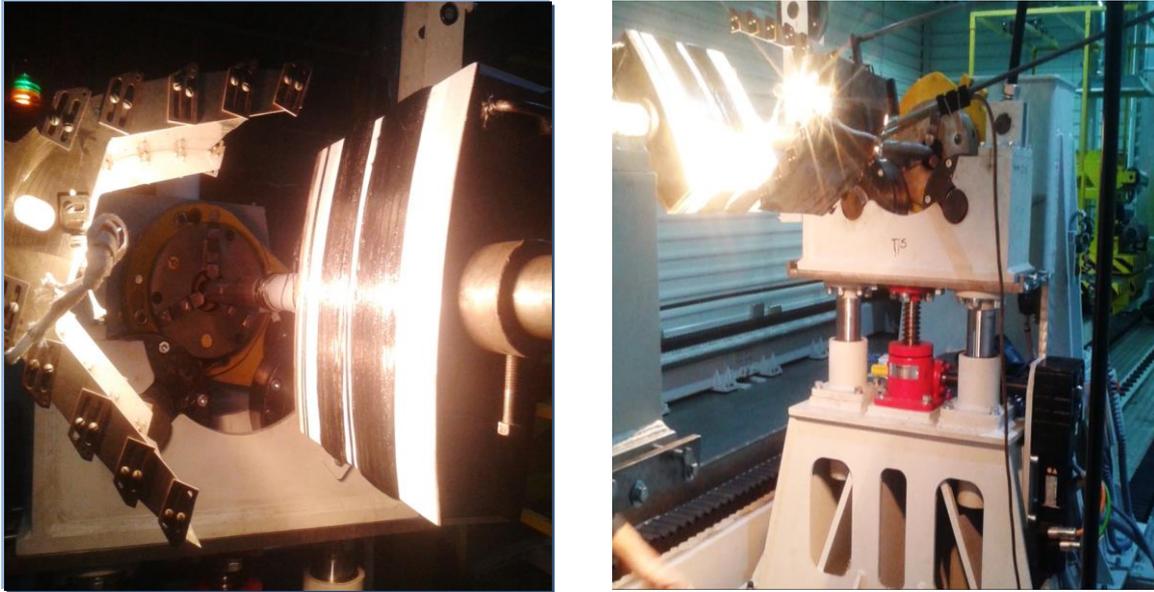


Рис. 9. Процесс изготовления углепластика

Измерения при испытаниях производились по датчику силоизмерителя модернизированной испытательной машины *TiraTest-2300*. При измерении геометрических параметров образцов использовались микрометр и штангенциркуль.

Характеристики определялись в соответствии с отраслевым стандартом «Пластмассы теплозащитного и конструкционного назначения. Метод испытания на сдвиг» ОСТ 92-1462-76.

Расчет разрушающего напряжения выполнялся по формуле:

$$\sigma_{\text{сдв}} = 3/4 \times P_{\text{сд}} / (b \times s),$$

где $P_{\text{сд}}$ – разрушающая нагрузка, Н;

b – толщина образца, мм; s – ширина образца, мм.

Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Результаты испытаний на сдвиг углепластика изготовленного с применением приспособления для дистанционного нагрева

Образец	Толщина b , мм	Ширина s , мм	Нагрузка $P_{\text{сд}}$, Н	Разрушающее напряжение $\sigma_{\text{сдв}}$, МПа
1	1,30	15,18	1102,87	42
2	1,45	15,04	1432,28	49
3	1,32	13,70	1059,92	44
4	1,52	14,42	1493,69	51
5	1,35	15,30	1189,14	43

Механика элементов конструкции

Образец	Толщина b , мм	Ширина s , мм	Нагрузка $P_{сд}$, Н	Разрушающее напряжение $\sigma_{сдв}$, МПа
6	1,36	15,24	1225,06	44
Ср				46

Полученные результаты сравнивались с результатами испытаний на сдвиг углепластика, изготовленного конвективным нагревом.

Таблица 4.

Результаты испытаний на сдвиг углепластика
изготовленного конвективным нагревом

Образец	Толщина b , мм	Ширина s , мм	Нагрузка $P_{сд}$, Н	Разрушающее напряжение $\sigma_{сдв}$, МПа
1	1,40	14,90	1008,94	36
2	1,35	15,35	952,41	34
3	1,35	15,10	998,80	37
4	1,35	14,75	961,98	36
5	1,35	15,35	1018,77	37
6	1,45	15,20	1007,79	34
Ср				36

Прочность при сдвиге образцов, изготовленных с применением ИК нагрева на 20% выше, чем для таковых, изготовленных при помощи конвективного нагрева.

Кроме того, полученные с применением ИК нагрева образцы имеют стабильные механические характеристики при значительном сокращении времени отверждения, что немаловажно для процесса производства в целом (есть возможность сокращения времени отверждения изделия на 30 ... 40%).

Выводы

1. Для повышения качества, прочности и стабильности изготовленных изделий из ПКМ было разработано приспособление, способствующее значительному улучшению смачиваемости волокон наполнителя, облегчающее проникновение связующего в межволоконное пространство волокнистого наполнителя.

2. При рационально подобранном и установленном наборе галогеновых ламп накаливания в приспособлении для дистанционного нагрева углепластиков в процессе намотки наблюдается стабильное увеличение физико-механических характеристик (около 20%) по сравнению с характеристиками, полученными на углепластике, отвержденном только конвективным нагревом.
3. Применение инфракрасного нагрева во время намотки изделий из ПКМ позволяет интенсифицировать технологический процесс изготовления изделий, снизить трудоемкость процесса и повысить эксплуатационные характеристики материала. Возможность применения инфракрасного нагрева в технологическом процессе получения углепластиков конструкционного назначения при значительной интенсификации процесса отверждения для изделий ракетно-космической техники является весьма актуальным при современном производстве изделий из композитов.

Список использованной литературы

1. Джур Е. О. Полімерні композиційні матеріали в РКТ / Е. О. Джур, Л. Д. Кучма, Т. А. Манько // К., Вища школа, 2003, 399 с.
2. Новиков И. И. Металловедение, термообработка / И. И. Новиков // М., Металургія, 1994, 480 с.
3. Паспорт на материалы. Эпоксидное трёхкомпонентное связующее Araldite LY 1135-1 A/Aradur 917 CH/Accelerator 960-1, компании Huntsman (Германия).
4. Комков М. А. Влияние вязкости связующего в пропиточной ванне на пористость композита при мокром способе намотки / М. А. Комков, В. А. Тарасов // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, с. 192-199.
5. ОСТ 92-1462-76 – Пластмассы теплозащитного и конструкционного назначения. Метод испытания на сдвиг по слою.
6. Technology Guidebook for Electric Infrared Process Heating, Cincinnati: Infrared Equipment Association, 1993. Battelle Columbus Division, Electric.
7. Infrared Heater Guide – Reviews & Comparison 2015 (<http://www.spaceheatercenter.com/best-infraredheater-reviews-guide/>).
8. Schmidt, F. "Modelling of Infrared Heating of Thermoplastic Sheet Used in Thermoforming Process." Journal of Materials Processing Technology 143-144 (2003): 225-31.