

УДК 648.8

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-34-38

А.В. Борцев<sup>1</sup>, Ю.А. Гусев<sup>1</sup>**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
В АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*В настоящее время перед автопроизводителями стоит задача уменьшения массы деталей кузова машины для сокращения расхода топлива. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) могут служить альтернативой металлам, так как имеют лучшие коррозионные и усталостные свойства, соотношение массы к прочности и хорошую ударостойкость. Однако чтобы полностью использовать высокий потенциал ПКМ в автомобильной промышленности, необходимо применение высокопроизводительных и низкозатратных технологий. Технология пропитки под высоким давлением – новый процесс, основанный на RTM-технологии, которая позволяет использовать высокореактивные связующие в очень короткий промежуток времени (<5–10 мин). Эта технология сочетает высокие механические свойства деталей (как в RTM-технологии) и короткий цикл отверждения. HP-RTM-технология имеет большой потенциал для применения в автомобильной промышленности. Рассмотрено влияние различных параметров процесса на механические свойства и качество плит, представлены графические зависимости этих свойств.*

**Ключевые слова:** композиционные материалы, пропитка под давлением, HP-RTM, автомобилестроение.

*To reduce a fuel consumption by cars it is necessary for automakers to solve the task of re-duction of body parts weight. Polymer composite materials (PCM) can serve as alternative to metals, they have better corrosion and fatigue properties, strength to weight ratio and good impact resistance. However, to exploit completely a high potential of PCM in the automotive industry new high-performance and low-cost technologies are to be used. Impregnation under high pressure is a new technological process based on the RTM technology which allows to use high-reactive binders in a very short period of time (<5–10 min). This technology combines high mechanical properties of the formed parts (both RTM technology) and a short curing cycle. HP-RTM technology has a high potential for application in the automotive industry. This article examines the influence of various process parameters on mechanical properties and quality of plates, graphic curves of these properties are presented.*

**Keywords:** composite materials, resin transfer molding, HP-RTM, automotive industry.

<sup>1</sup>Федеральное 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**

В настоящее время авиационная промышленность остается одним из наиболее высокотехнологических секторов экономики, однако без новых материалов невозможно развитие и других отраслей промышленности – электроэнергетики, машиностроения, строительства, медицины, приборостроения и других [1]. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) не только успешно конкурируют с металлами, но и позволяют получать в изделиях дополнительное сочетание ряда специфических свойств [2, 3].

В последние десятилетия пропитка под давлением широко используется для производства композиционных изделий в морских и автомобильных секторах промышленности. Повысился интерес к RTM-процессу (Resin Transfer Moulding) у лидирующих предприятий по производству автомобильных запчастей [4]. Система пропитки под давлением позволяет выпускать сложные крупногабаритные детали с высокой консистенцией связующего, жесткими геометрическими и механическими допусками [5]. Поскольку впрыск смолы в среднем занимает 30–120 мин, то это усложняет применение RTM-технологии для производства деталей в боль-

шом объеме. Применение HP-RTM-технологии (Resin Transfer Moulding with high-pressure) способно увеличить объем производства в разы, так как продолжительность цикла в этом процессе значительно сокращена за счет высокого давления впрыска смолы. Этот метод позволяет использовать высокореактивные смолы за очень короткое время цикла пропитки (<5–10 мин), но в этой технологии есть свои недостатки. Основные из них – дорогостоящая оснастка, которая способна выдержать напряжение, создаваемое за счет высокого давления, и возможность деформации ткани при пропитке [6]. Но эта технология позволяет получить высокие механические характеристики деталей при коротком режиме отверждения смолы, что представляет большой интерес для крупнейших автомобильных производителей и поставщиков автомобильных запчастей [7].

В HP-RTM-процессе заготовку помещают в полностью закрытую пресс-форму. Технология изготовления стеклопластика по методу инъекции эпоксидной смолы в закрытую форму требует использования специального оборудования, которое представляет собой оснастку, состоящую из двух частей: матрицы и пуансона (ответной формы) [8]. При необходимости перед уклад-

кой стеклоткани на оснастку наносят антиадгезионную смазку. Для уплотнения ткани до нужной толщины используют гидравлический пресс или болтовое соединение [9]. После закрытия пресс-формы связующее вводят в полость под высоким давлением – от 0,1 до 2 МПа (рис. 1). Для экономии времени смолу и отвердитель смешивают непосредственно перед впрыском, что позволяет использовать связующие с небольшой жизнеспособностью [10].

#### Материалы и методы

Связующие, используемые в методах пропитки под давлением, должны удовлетворять ряду специфических требований. Состав связующего должен подбираться таким образом, чтобы отверждение прошло в минимальные сроки. Особенно важным требованием является обеспечение прогнозируемого уровня реологических свойств связующего, позволяющих активно инжектировать его в форму, а также сохранение требуемой вязкости в ходе пропитки пакета [11, 12]. Для эксперимента использовали эпоксидное связующее с небольшой жизнеспособностью при определенной температуре [13]. На рис. 2 показано изменение вязкости связующего от продолжительности пропитки при различных температурах. По этим зависимостям можно выбрать оптимальную температуру пропитки. Так, при температуре 100°C связующее достигает гелеобразного состояния через 300 с и полностью отверждается менее чем за 360 с (~6 мин). Заметим также, что смола достигает вязкости >0,1 Па·с по истечении 240 с. С точки зрения производства это означает, что заполнение формы и пропитка всего наполнителя должны занимать ≤280 с.

В качестве наполнителя использована стеклоткань, выложенная в пресс-форму с укладкой [0°/90°/90°/0°]. Для того чтобы не происходило смещения волокон ткани, каждый выложенный слой пропитывается концентратом связующего с 4 и 8%-ной концентрацией.

#### Параметры процесса

Связующее и отвердитель предварительно заливают в дозатор и нагревают до температуры 80°C, смешивание происходит в нужном соотношении в емкости с кулером. Шланг, соединяющий емкость со связующим, и пресс-форма предварительно нагреты до температуры 100°C. Входное отверстие для впрыска связующего и вентиляционный выход расположены на противоположных сторонах пресс-формы. На основе данных по характеристикам смолы установлена продолжительность пропитки – не более 7 мин. Каждый слой пакета размером 0,47×0,47 м прессуют с помощью болтовых соединений до общей толщины 1 мм, где 0,2 мм – это свободное пространство для лучшей проницаемости.

Для эксперимента выбрали три значения скорости впрыска связующего: 15, 35 и 60 г/с. В таблице приведены значения переменных параметров, которые изучались в данном исследовании, а также рассмотрено их воздействие на механические характеристики и качество плит, полученных с помощью HP-RTM-метода.

Для оценки влияния условий обработки на механические свойства панелей в качестве испытаний выбраны трехточечный изгиб (ASTM D790) и растяжение образцов (ГОСТ 25.601–80) [14, 15]. Для испытаний из каждой панели вырезано по 5 образцов и по ASTM D2584 определена объемная доля волокна и содержание пор в панелях [16]. Образцы отжигали в муфельной печи при температуре 600°C в течение 2 ч.

В некоторых случаях в образцах, предназначенных для испытаний на растяжение, наблюдался перекос волокон. Известно, что даже небольшое отклонение от правильного расположения волокон вызывает снижение прочности. Смещение волокна характеризуется отношением отклонения длины волокна относительно ширины образца [17]. Во время эксперимента выявлено, что наибольшее отклонение волокна наблюдалось у образцов, полученных при большой скорости пропитки, которые предварительно не пропитывали концентратом связующего (рис. 3). Наличие плотной упаковки уменьшило проницаемость пакета, но перекос волокон составил ~25%. Предварительная пропитка помогла уменьшить смещение волокон, однако при максимальной скорости подачи смолы по-прежнему наблюдается перекос (~40%).

Влияние наличия свободного пространства в пресс-форме исследовали только на сухой ткани – без предварительной пропитки. При уплотнении пакета до нужной толщины монослоя, проницаемость уменьшается, что соответственно увеличивает продолжительность пропитки. Полное отсутствие вспомогательного канала пропитки привело к недопропитке пакета, которую не получалось ликвидировать даже при увеличении давления впрыска (рис. 4, а). Даже небольшое разряжение пакета (0,2 мм) способствовало получению нужного результата (см. рис. 4, б). Панель из стеклопластика полностью пропиталась, и на образцах наблюдался минимальный перекос волокон (~15%). Нужную толщину монослоя удалось получить путем дальнейшего сдавливания пресс-формы непосредственно перед желированием связующего.

На рис. 5 представлены механические свойства при растяжении (средние значения) образцов, полученных HP-RTM-методом при различных условиях – с применением и без применения вакуума и с различными скоростями впрыска связующего (15, 35 и 60 г/с). Видно, что предварительно пропитанная 4%-ным раствором

Параметры процесса, рассмотренные в исследовании

Параметры процесса	Переменные величины
Скорость впрыска, г/с	15; 35; 60
Последовательность использования вакуума	1. Отсутствие вакуума 2. Наличие вакуума при заполнении пресс-формы
Концентрация связующего, %	0; 4; 8
Наличие свободного пространства в пресс-форме	1. Отсутствие 2. 0,2 мм

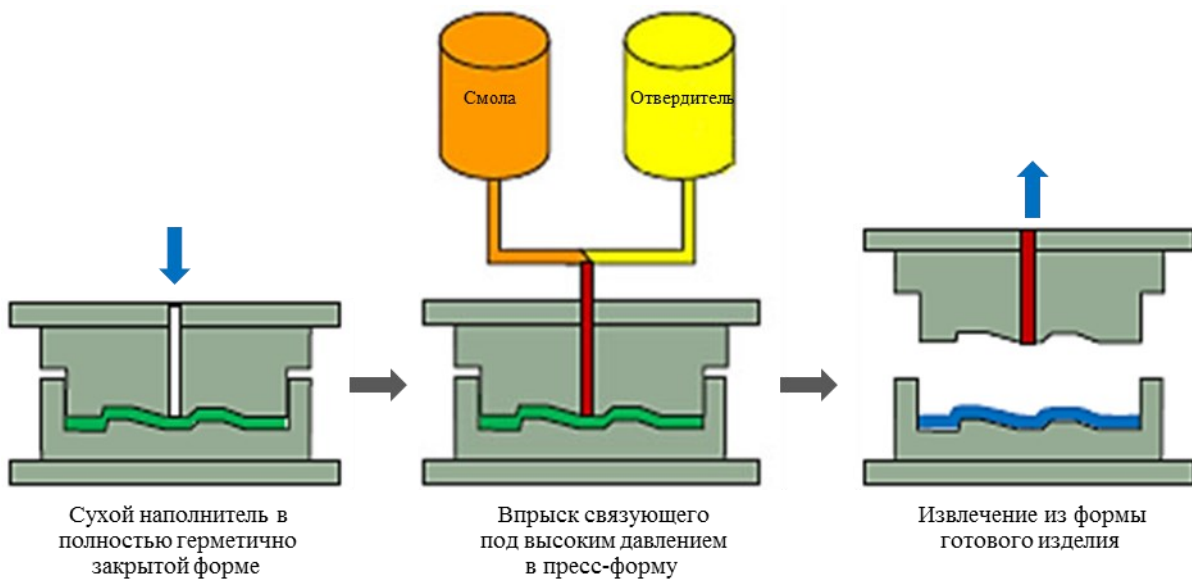


Рис. 1. Последовательность действий при HP-RTM-процессе



Рис. 2. Критические кривые вязкости при температуре 100 (1), 90 (2), 80 (3) и 70°C (4)



Рис. 3. Зависимость предела отклонения перекося волокна от скорости подачи смолы и предварительной пропитки концентратом связующего с содержанием 4 (▲) и 8% (■); ● – без пропитки концентратом



Рис. 4. Вид плиты, имеющей предварительную плотную упаковку из ткани (а) и вид плиты, полученной с использованием свободного пространства в пресс-форме при пропитке (б)

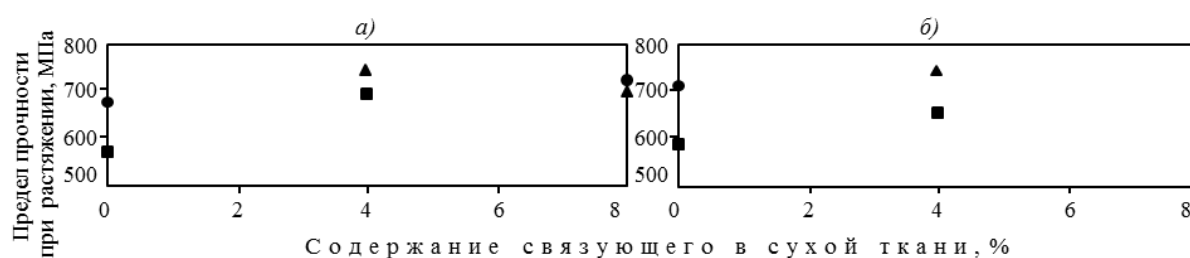


Рис. 5. Свойства панелей при растяжении с применением вакуума (а) и без вакуума (б) при скорости впрыска 15 (●), 35 (▲) и 60 г/с (■)

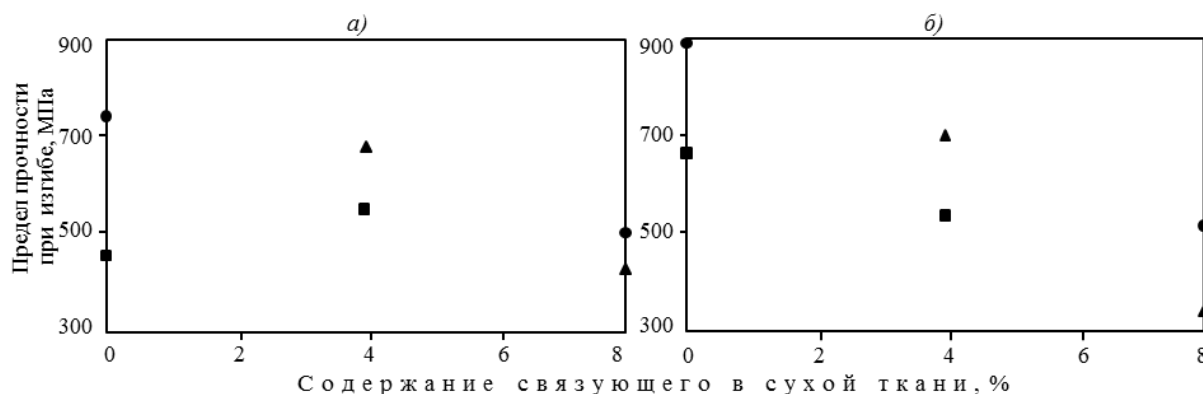


Рис. 6. Свойства панелей при трехточечном изгибе с применением вакуума (а) и без вакуума (б) при скорости впрыска 15 (●), 35 (▲) и 60 г/с (■)

связующего ткань имеет наибольшие показатели при растяжении. Кроме того, увеличение скорости пропитки не сильно повлияло на показатели прочности при растяжении образцов, что аналогично и для панелей, сделанных с применением вакуума. Таким образом, применение вакуума не способствует улучшению механических свойств при испытаниях на растяжение.

Проведены также испытания на изгиб образцов, полученных HP-RTM-методом при тех же условиях (рис. 6). При предварительной пропитке с 8%-ным содержанием связующего наблюдается значительная потеря прочности. Скорость впрыска не повлияла на предел прочности при изгибе, за исключением образцов, ткань которых не подвергалась предварительной пропитке. В этом случае – чем меньше скорость подачи смолы, тем выше модуль упругости и прочность при изгибе. Использование вакуума при пропитке в этом случае сыграло положительную роль. Прочность при изгибе возросла в среднем на 10%, а также уменьшился разброс значений свойств.

Испытания образцов на определение процентного содержания пор и объема наполнителя проводили на панели, которую предварительно не подвергали пропитке при скорости впрыска 15 г/с. Содержание пор в панели, которую пропитывали без использования вакуума, составило ~4% (по расчету); что является приемлемым результатом для изделий, применяемых в автомобилестроении. Панель, полученная с использованием вакуума при пропитке, уже имела пористость в среднем ~2%.

## Результаты

В результате проведенного эксперимента получены панели из стеклоткани и эпоксидной смолы с хорошими механическими свойствами при достаточно высокой скорости впрыска связующего. Следовательно, за короткий промежуток времени возможно сделать деталь, имеющую хороший внешний вид и в которой практически отсутствует перекос волокон. Наличие вакуума при пропитке благоприятно повлияло на уменьшение пористости панели, а также на увеличение прочности при испытаниях на изгиб. Концентрация связующего в ткани до пропитки определенно влияет на механические свойства изделия. Так, большая концентрация связующего в предварительно пропитанной ткани ухудшает свойства панели при изгибе. Таким образом, в результате полученных данных можно предположить, что низкая концентрация связующего ( $\leq 5\%$ ) не влияет на проницаемость пакета наполнителя и ткань хорошо пропитывается. При более высокой концентрации связующего проницаемость ткани уменьшается, что неблагоприятно влияет на скорость пропитки. Выявлено также, что для HP-RTM-процесса лучше не спрессовывать ткань до расчетной толщины, а оставлять небольшое пространство в пресс-форме для лучшей проницаемости пакета наполнителя и соответственно быстроты пропитки. Тем более, что существует возможность получить нужный монослой панели с помощью сдавливания пресс-формы непосредственно перед отверждением смолы.

### Заключение

В данной работе исследованы: скорость потока смолы, влияние предварительной пропитки концентратом связующего, влияние вакуума на свойства материала, а также два способа спрессовывания формы во время пропитки. Процесс позволяет производить композиционные детали менее чем за 7 мин в зависимости от выбора режима отверждения связующего. При предварительной пропитке сухой ткани возможно использование высоких скоростей впрыска, что незначительно повлияло на проницаемость пакета наполнителя. Использование вакуума позволило повысить механиче-

ские свойства изделия и снизить содержание пор в материале. Таким образом, можно предположить, что низкая концентрация связующего в сухой ткани, наличие свободного пространства в пресс-форме, использование вакуума, а также средняя скорость впрыска являются наиболее благоприятными факторами при HP-RTM-пропитке. При исследовании продемонстрирован большой потенциал HP-RTM-пропитки для производства высококачественных композитных изделий при большом объеме производства – например в автомобильной промышленности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
2. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Стеклопластики – многофункциональные композиционные материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 253–260.
3. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов //Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. №3–4. С. 24–42.
4. Christian F. Lightweight automotive design with HP-RTM //Reinforced Plastics. 2011. P. 29–31.
5. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 18–26.
6. Chensong Dong. A modified rule of mixture for the vacuum-assisted resin transfer moulding process simulation //Composites Science and Technology. 2008. V. 68. №9. P. 2125–2133.
7. Simacek P., Suresh G., Stanley A. Modeling Flow in Compression Resin Transfer Molding for Manufacturing of Complex Lightweight High-Performance Automotive Parts //Journal of Composite Materials. 2008. №42. P. 2523–2545.
8. Нелюб В.А., Гращенков Д.В., Коган Д.И., Соколов И.А. Применение прямых методов формования при производстве крупногабаритных деталей из стеклопластиков //Химическая технология. 2012. Т. 13. №12. С. 17–23.
9. Борщев А.В., Хрульков А.В., Халтурина Д.С. Изготовление низкопористого полимерного композиционного материала для применения в слабо- и средненагруженных конструкциях //Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст. 03 (viam-works.ru).
10. Mouton S., Teissandier D., Sebastian P., Nadeau J.P. Manufacturing requirements in design: the rtm process in aeronautics //Composites. Part A. Applied Science and Manufacturing. 2010. V. 41. №1. P. 125–130.
11. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38–42.
12. Старцев О.В., Каблов Е.Н., Махоньков А.Ю. Закономерности перехода эпоксидных связующих композиционных материалов по данным динамического механического анализа //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 104–113.
13. Бабин А.Н. Связующие для полимерных композиционных материалов нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).
14. ASTM Standard D790. Standard Test Method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM International. 2003.
15. ГОСТ 25.601–80. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. М.: Изд-во стандартов. 1980.
16. ASTM Standard D3039. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM International. 2002.
17. Deleglise M. Modeling of high speed RTM injection with highly reactive resin with on-line mixing //Applied Science and Manufacturing. 2011. V. 42(10). P. 1390–1397.