

Исследование одноступенчатого процесса изготовления сэндвич-конструкций с напылением вспенивающегося полиуретана

Потребность разных отраслей промышленности в эффективных и пригодных для серийного использования технологий производства легких конструкций остается неизменно высокой. В этой связи все большее значение приобретают сэндвич-конструкции с тонкими обшивками из волокнистых полимерных композиционных материалов (ПКМ). В Институте легких конструкций и полимерных технологий Технического университета г. Дрездена была разработана экономичная одноступенчатая технология изготовления сэндвич-конструкций с применением метода напыления вспенивающегося полиуретана (ПУ). Давление, создаваемое при вспенивании этого ПУ, используется одновременно для пропитки текстильных заготовок обшивок. Приводятся результаты исследования влияния технологических параметров процесса на степень пропитки и структуру сэндвич-конструкций.

О. Вайссенборн, С. Геллер, М. Гуде, д-р, Институт легких конструкций и полимерных технологий Технического университета г. Дрездена (Германия)

Введение

Трехслойные или, иначе, сэндвич-конструкции являются типичными представителями современных легких изделий конструкционного назначения. Принцип их создания основан на комбинации обладающих высокой жесткостью и прочностью тонких внешних обшивок и легкого внутреннего заполнителя (пенопласта или сотопласта) со сравнительно высокой устойчивостью к сдвиговым нагрузкам. При использовании в качестве заполнителя материала с низкой плотностью можно за счет увеличения поперечного сечения изделия (высоты сэндвич-конструкции) добиться существенного повышения момента инерции сечения и тем самым жесткости сэндвич-конструкции без значительного увеличения массы изделия в целом. В качестве заполнителя часто применяются полимерные материалы, имеющие ячеистую структуру, например, на основе вспененных ПУ; при изготовлении высокопрочных обшивок предпочтение отдается листовым волокнистым ПКМ, обладающим высокими удельными упруго-прочностными свойствами [1].

Изготовление сэндвич-конструкций с обшивками из листовых ПКМ осуществляется, как правило, с применением многоступенчатых способов. Таким способом может быть, например, сбор-

ка с помощью склеивания предварительно изготовленных обшивок с готовым заполнителем, имеющим форму, близкую к форме конечного изделия. Другой многоступенчатый способ заключается также в раздельном изготовлении обшивок, но с последующим вспениванием пенообразующей композиции в полости между обшивками. Известны также технологии изготовления сэндвич-конструкций с применением напыления смеси компонентов ПУ; к ним относятся, в частности, технологии Long-Fibre-Injection (LFI) и PUComposite-Spray-Moulding (PUCSM) [2]. При этом на бумажный сотовый заполнитель с обеих сторон напыляется смесь вспенивающегося ПУ и коротких стеклянных волокон, выполняющих затем – после монолитизации смеси и отверждения ПУ в закрытой форме – роль армирующего компонента обшивок.

Несущая способность сэндвич-конструкций с обшивками, наполненными короткими волокнами, ниже, чем при использовании обшивок, армированных непрерывными волокнами. К тому же все перечисленные выше технологии являются многоступенчатыми, так как изготовление обшивок и заполнителя осуществляется в основном раздельно и требует дополнительной операции сборки. С учетом этих обстоятельств в Институте легких конструкций и полимерных технологий Технического университета г. Дрездена (Institut fuer Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden) были проведены исследовательские работы в направлении существенного усовершенствования применявшихся до сих пор технологий. Принцип нового решения заключается в том, что напыляемая вспенивающаяся ПУ-композиция одновременно образует заполнитель

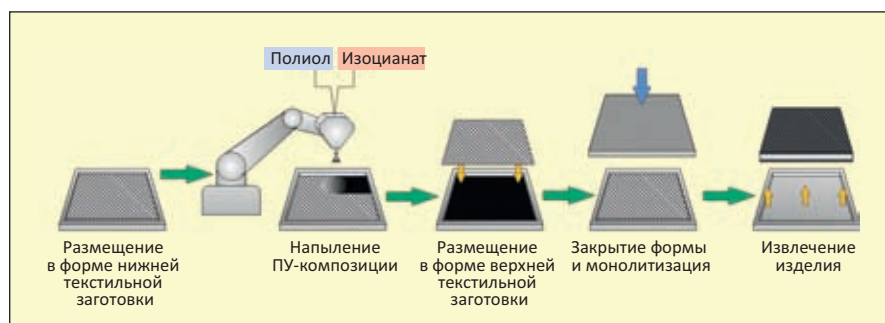


Рис. 1. Схема одноступенчатого процесса изготовления сэндвич-конструкций с использованием вспенивающегося ПУ (все иллюстрации: автор)



сэндвич-конструкции и пропитывает сухие текстильные заготовки обшивок, выполняя роль связующего. В результате этого процесса, проводимого в оформляющей полости формы, формируется сэндвич-конструкция, конфигурация которой, соответствующая геометрии оформляющей полости, фиксируется при отверждении ПУ-композиции [3, 4]. Такая одноступенчатая технология характеризуется высокой экономичностью, так как, помимо снижения трудоемкости процесса, для изготовления изделий сложной конфигурации требуется всего лишь одна форма (рис. 1). Поскольку монолитизация обшивок и изготовление наполнителя осуществляются в ходе одной-единственной стадии технологического процесса, то за счет этого обеспечивается уменьшение затрат времени и средств. В рамках проведенного исследования предстояло путем анализа полученных под микроскопом изображений шлифов изучить и оценить влияние технологических параметров на структуру сэндвич-конструкций [5].

1. Определение степени пропитки

Готовые сэндвич-конструкции всегда имеют как в обшивках, так и во вспененном наполнителе известное количество пор. Эти воздушные включения, типичные для вспененного наполнителя, играют негативную роль в обшивках из ПКМ, так как при определенных нагрузках могут приводить к ухудшению механических свойств изделия, выступая концентраторами напряжений. Таким образом, одной из целей оптимизации технологического процесса является уменьшение пористости в обшивках при высокой степени вспенивания наполнителя. В этой связи был использован критерий «степень пропитки» текстильных заготовок обшивок в качестве количественной характеристики, используемой для анализа и оценки влияния технологических параметров на структуру и качество сэндвич-конструкций.

Степень пропитки определяли, исследуя микроструктуру материала с помощью микроскопии в отраженном свете шлифов сечения образцов

полученных сэндвич-конструкций. Для анализа участков обшивки использовали метод построения так называемой гистограммы, которая позволяет отобразить распределение точек изображения в соответствии с градацией серой шкалы. По причине различий в уровнях серого цвета, относящихся к отдельным компонентам ПКМ – армирующим волокнам, монолитной матрице и порам – получается гистограмма вполне определенного характерного вида (рис. 2).

Наряду со специфическими пиками на этой гистограмме наблюдаются выраженные промежуточные участки, которые первоначально не могли быть однозначно поставлены в соответствие с компонентами ПКМ. После установления определенного порогового значения, расположенного на относительном удалении порядка 50 % между пиками, появилась возможность воспроизводимого определения долевого содержания уровней серой шкалы. С учетом долевого содержания площадей пор (A_p), волокон (A_f) и общей площади (A_c) степень

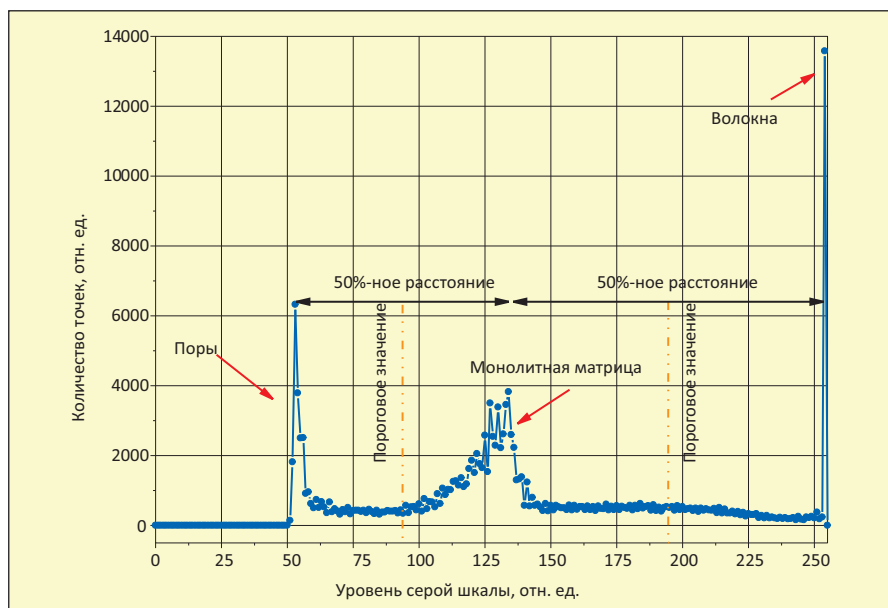


Рис. 2. Характерная гистограмма распределения точек соответствующего уровня серой шкалы, отображающая наличие в обшивке сэндвич-конструкции волокон, монолитной матрицы и пор

пропитки k вычисляется по следующему уравнению:

$$k (\%) = 100 \cdot [1 - A_p / (A_t - A_p)]$$

Механические свойства волокнистых ПКМ среди прочего зависят от длины волокон, их ориентации и прочности связи с матрицей. Наличие же пор, как отмечалось выше, приводит к ухудшению прочности ПКМ. По этой причине определение степени пропитки играет центральную роль при анализе и оценке влияния технологических параметров на качество конечного изделия.

2. Влияние плотности матрицы

Образования пор в пеноматериале в области, прилегающей к обшивкам, избежать не удастся, в результате чего возникает технологически обусловленный конфликт целей. С одной стороны, пеноматериал по определению должен быть пористым в целях снижения его кажущейся плотности, а с другой стороны, повышенная пористость пены снижает эффективность пропитки текстильной заготовки обшивки. Эксперименты, выполненные с некоторыми видами исследованных заготовок, показали, что достигаемая степень пропитки напрямую зависит от плотности ПУ-композиции и связанного с этим давления вспенивания (рис. 3). В связи с особенностями технологического процесса нанесение реакционно-способной ПУ-смеси осуществляется сначала на нижнюю текстильную заготовку, в то время как пропитка

верхнего слоя происходит с некоторым запаздыванием, обусловленным затратами времени на удаление распылительной головки из зоны формы.

Повышенная плотность (иначе – пониженная пористость) вспенивающегося связующего хотя и оказывает благоприятное влияние на достижение более высокой степени пропитки, но одновременно противоречит стремлению к образованию легкого заполнителя сэндвич-конструкции с оптимальной массой. Результаты экспериментальных исследований позволили установить, что уменьшение плотности матрицы примерно на 65 % (с 0,77 до 0,27 г/см³) вызывает снижение степени пропитки заготовки обшивки на 30–40 %.

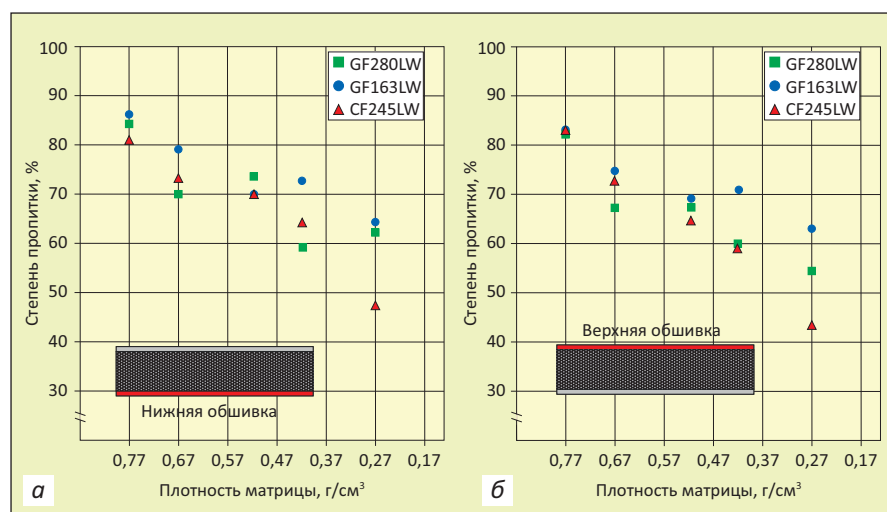


Рис. 3. Влияние плотности ПУ-композиции на степень пропитки нижней (а) и верхней (б) обшивки при использовании текстильных заготовок из стеклянных (марок GF 280LW и GF 163LW) и углеродных (CF245LW) волокон

Полученные данные позволяют оценить результирующую степень пропитки при варьировании плотности заполнителя и учитывать ее при выборе конструктивного исполнения изделий с точки зрения достижения требуемых механических свойств.

3. Влияние температуры формы и времени выдержки

Смешивание компонентов вспенивающейся ПУ-композиции (полиола и изоцианата) осуществляется при температуре около 26 °С в режиме противотока при их инъекции под высоким давлением. Температура же формы может варьироваться в интервале от 45 до 80 °С. Исследование степени пропитки, выполненное в этом диапазоне температур, показало, что путем регулирования температуры формы можно оказывать существенное влияние на локальную структуру пеноматериала и обшивки. В частности, относительно низкая температура формы способствует образованию почти монолитных граничных слоев, примыкающих к обшивкам (фото 1, а). Увеличение температуры формы способствует повышению реакционной способности компонентов смеси, что проявляется не только в уменьшении продолжительности реакции, но и в образовании пор увеличенных размеров в пеноматериале. Это непосредственным образом отражается на степени пропитки текстильных заготовок обшивок (фото 1, б–г).

Кроме того, более быстрое протекание реакции отверждения ПУ-

композиции при повышенных температурах и, соответственно, более интенсивное пенообразование обуславливают смещение отдельных филламентов нижней текстильной заготовки в направлении ее толщины, из-за чего затрудняется задаваемое разграничение обшивки и заполнителя в получаемой сэндвич-конструкции. Однако оценить влияние этого смещения филламентов из зоны обшивки на механические показатели изделия не удалось.

Наряду с температурой формы важным технологическим фактором является также время выдержки, под которым подразумевается интервал времени от напыления ПУ-композиции на нижнюю заготовку в открытой форме до момента полного закрытия формы. Конструкция используемой установки, оснащенной роботизированным держателем формы, обуславливает время выдержки как минимум около 19 с, которое затрачивается на напыление ПУ-композиции на нижнюю текстильную заготовку, перевод открытой формы из распылительной кабины в пресс, раз-

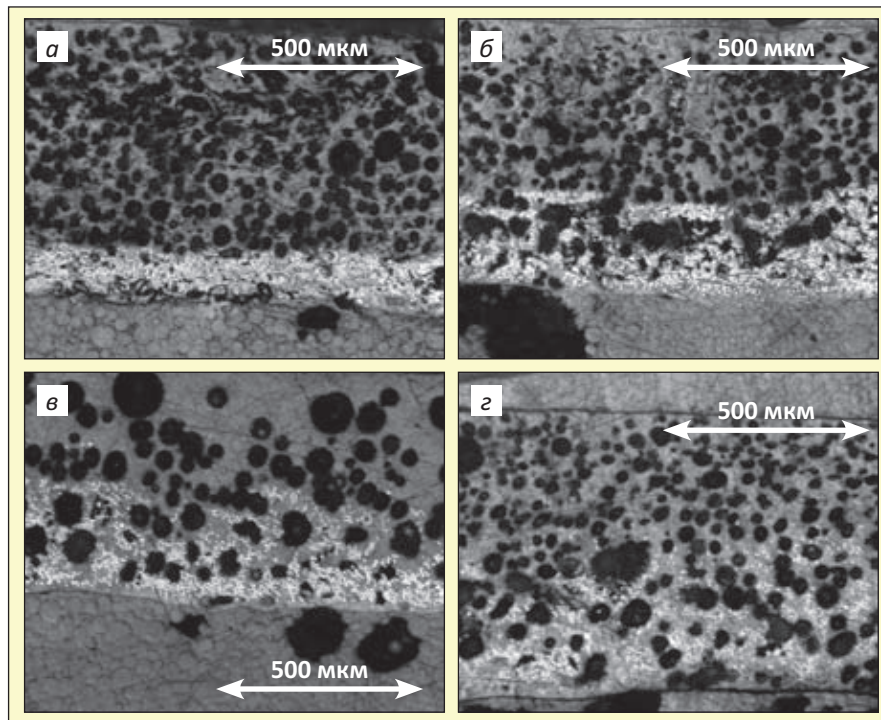


Фото 1. Влияние температуры T формы на структуру отдельных участков сэндвич-конструкций на примере полученных под микроскопом изображений шлифов сечений: а – $T = 48$ °C; б – $T = 59$ °C; в – $T = 68$ °C; г – $T = 78$ °C

мещение верхней текстильной заготовки и закрытие формы. В ходе исследований это минимально воз-

можное время использовалось в качестве условной эталонной величины ($t = 0$ с).

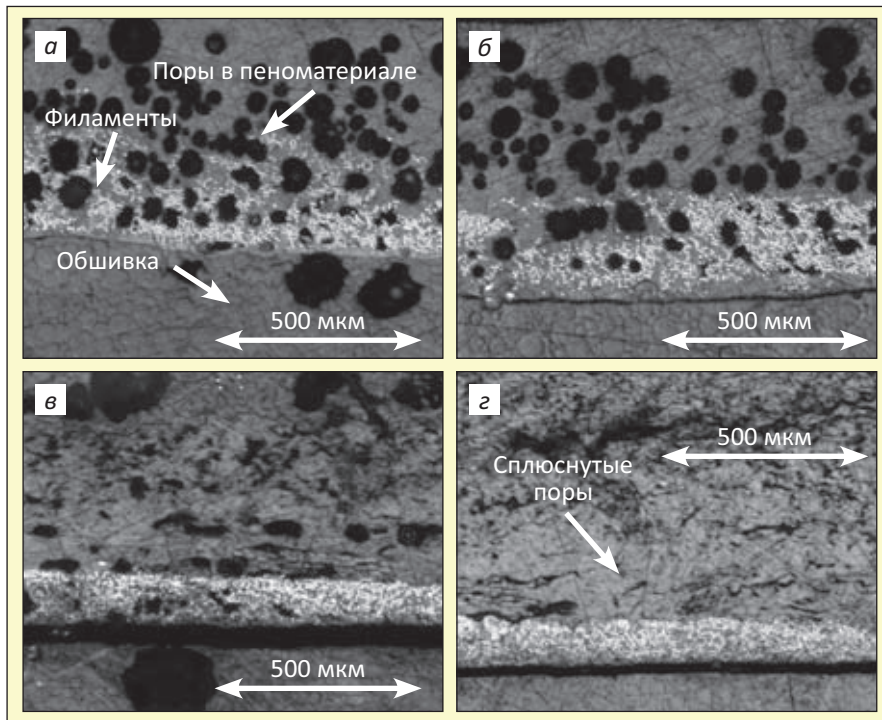


Фото 2. Влияние времени выдержки t на структуру отдельных участков сэндвич-конструкций на примере полученных под микроскопом изображений шлифов сечений: а – $t = 0$ с; б – $t = 10$ с; в – $t = 20$ с; г – $t = 30$ с

Результаты исследований показали, что при малом времени выдержки расширение вспенивающейся ПУ-композиции происходит практически полностью в закрытой форме. Это обуславливает образование пористой структуры внутри текстильных заготовок (фото 2, а). При увеличенном времени выдержки расширение вспенивающейся ПУ-композиции осуществляется главным образом в открытой форме. По причине отсутствия ограничения объема – как это имеет место в закрытой форме – ПУ-композиция расширяется в направлении удаления от нижней текстильной заготовки по толщине, т. е. расширение пеноматериала происходит практически в свободном состоянии. Одно-

временно под действием силы тяжести и капиллярного эффекта осуществляется пропитка нижней текстильной заготовки. При выполнении с задержкой во времени последующем закрывании формы поры сжимаются, и в пеноматериале образуются участки с уменьшающимися по размерам порами (фото 2, б–г).

При увеличении времени выдержки слои вспененного ПУ, прилегающие к текстильным заготовкам, выглядят почти монолитными, что способствует обеспечению более высокой степени пропитки текстильных заготовок. Анализ полученных под микроскопом изображений и расчет степени пропитки позволили выявить однозначную корреляцию между температурой формы и време-

нем выдержки и достигаемой степени пропитки (рис. 4).

В дополнение к вышеизложенному была выполнена оценка пяти участков сэндвич-конструкций, соответствующих различным условиям проведения опытов, с целью определения статистического разброса результатов для каждого опыта. Обработка результатов экспериментов с применением методов дисперсионного анализа позволила выявить однозначную статистическую взаимосвязь исследуемых параметров. Построение линейных регрессионных моделей открывает возможности установления математических зависимостей между параметрами технологического процесса и результирующей степенью пропитки.

4. Микроструктура объекта исследования

Для оценки качества полученных сэндвич-конструкций наряду с определением степени пропитки заготовок обшивок полезную службу может сослужить анализ морфологии ячеистой структуры в области обшивок из ПКМ. Равномерное распределение пор при малой их величине не считается с точки зрения их влияния на механические свойства изделия более благоприятным, чем наличие разъединенных пор увеличенного объема. Обработка результатов экспериментальных исследований позволила установить наличие прямой взаимосвязи между плотностью матрицы и результирующим распределением пор по размерам (рис. 5).

В то время как независимо от плотности ПУ максимальное количество пор имеет среднюю площадь сечения S порядка 15–18 мкм², в распределении пор максимальной величины наблюдаются значительные различия в зависимости от плотности пеноматериала: при его высокой плотности образуется меньшее количество пор максимальной величины. Анализ микрофотографий шлифов при этом показывает, что по мере уменьшения плотности пеноматериала наблюдается все большее скапливание слившихся между собой пор вплоть до образования макропор; следовательно, максимальные размеры пор становятся характерными для менее плотного пеноматериала.

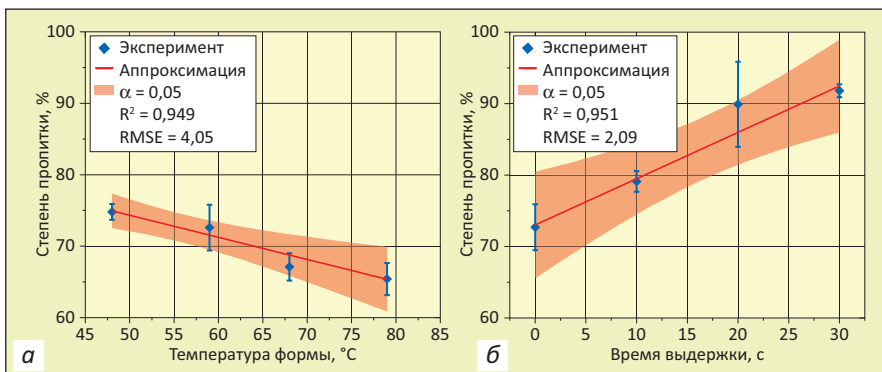


Рис. 4. Влияние температуры формы (а) и времени выдержки (б) на степень пропитки текстильных заготовок обшивок сэндвич-конструкций: α – уровень значимости; R^2 – квадрат коэффициента корреляции; RMSE – среднеквадратическое отклонение

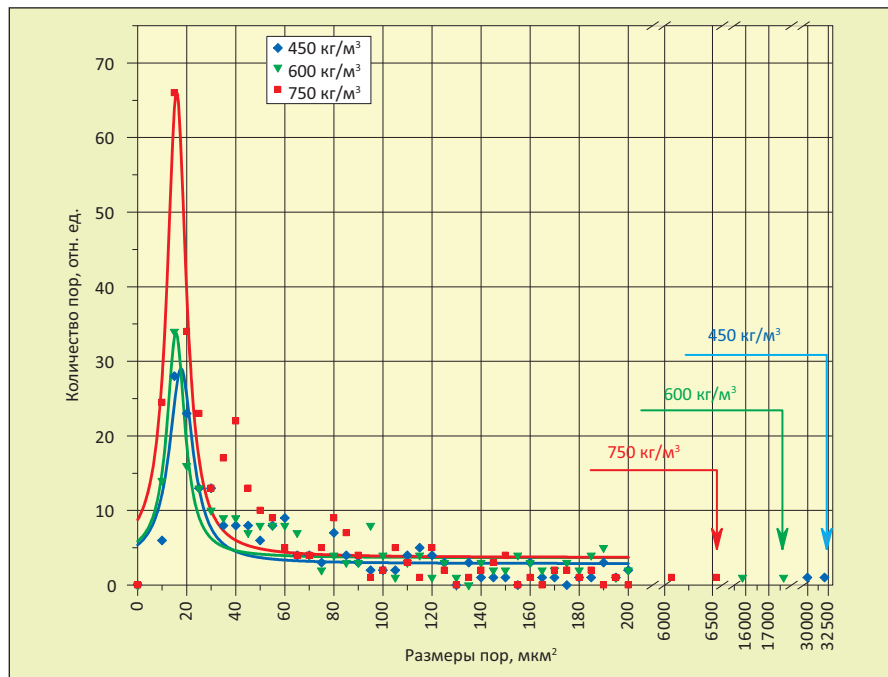


Рис. 5. Гистограмма распределения пор по размерам в области обшивок из ПКМ в зависимости от плотности пористой матрицы (кг/м³)

5. Заключение и выводы

Экономичные и более производительные технологии изготовления легких сэндвич-конструкций приобретают все больший интерес с точки зрения их применения в промышленных масштабах. Результаты исследованной в данной работе одноступенчатой технологии показали, что вспенивающийся ПУ вполне пригоден для пропитки текстильных заготовок несущих обшивок сэндвич-конструкций. Регулирование параметров технологического процесса – температуры формы и времени выдержки – позволя-

ет целенаправленно влиять на определяющие качество изделия показатели и прежде всего на морфологию пористой структуры пеноматериала и степень пропитки заготовок обшивок. На основе полученных результатов могут быть определены технологические режимы серийного производства сэндвич-конструкций по предложенной технологии.

Литература

1. *Kuppinger J., Kopp G., Dietrich E., Henning F.* Polyurethane base sandwich structures – Face sheet characteristics / SPE Automotive and Composites Divisions. – 12th

Annual Automotive Composites Conference and Exhibition 2012, ACCE 2012: Unleashing the Power of Design. – S. 393–412.

2. *Kleba I., Kirsten T.* Offen fuer vielfaeltige Anwendungen – PUR-Composite Spray Moulding (PUR-CSM) // Kunststoffe. – 2005. – Nr. 11. – S. 127–129.

3. *Gude M., Geller S., Weissenborn O.* Integral manufacture of fiberreinforced sandwich structures with cellular core using a polyurethane spray-coat method / Cellular Materials. – 2014, Oktober, Dresden. – P. 22–24.

4. *Weissenborn O., Geller S., Gude M.* Entwicklung und Charakterisierung integraler Sandwichstrukturen, hergestellt im Polyurethan-Spruehverfahren // PU Magazin. – 2016. – Nr. 2. – S. 110–113.

5. *Weissenborn O., Geller S., Gude M.* Analysis of Geometrical and Processrelated Parameters on the impregnation Quality of Advanced Cellular Composites // Advanced Engineering Materials. S. 1700087; DOI:10.1002/adem.201700087. 2017. 18.

Перевод А. П. Сергеенкова

Research of One-stage Process of Production Sandwich Structures Using a Polyurethane Spray-coat Method

O. Weissenborn, S. Geller, M. Gude

Results of a research of one-stage process of production sandwich designs using a polyurethane spray-coat method are given. Advantages of new technology are small expenses of time and means and also a possibility of use in mass production. ■

Weissenborn O., Geller S., Gude M. Prozessuntersuchungen zur Herstellung neuartiger Sandwichstrukturen im Polyurethan-Spruehverfahren // PU Magazin. – 2017. – Nr. 4. – S. 276–280.