

Моделирование в COMSOL Multi- physics условий армирования углепластиком изделий для ЖКХ

Рецензия эксперта на статью получена
27.02.2020 [Expert review on the article
received on February 27, 2020].

Введение

Заложенная при разработке прочность корпусных деталей и опорных элементов многих изделий ЖКХ обусловлена их функциональными и технико-экономическими характеристиками. Чтобы в период эксплуатации длительно сохранять на необходимом уровне устойчивость каркаса изделий, применяют ряд восстановительных технологических мероприятий. Например, часто используется технология армирования деталей конструкций углепластиком [1–4]. Это значительно увеличивает прочность без особого изменения структуры изделия. При этом, кроме высоких механических характеристик углепластика, используют также и другие его важные особенности. Углепластик применяют как декоративный материал для отделки салонов транспортных средств, интерьеров офисных помещений и залов. Учитывается также, что слой углепластика не позволяет проникать многим смесям, красителям, образуя своеобразный сорбентный щит, который служит для защиты конструкционных материалов.

При производстве изделий ЖКХ, строительстве коммуникаций, создании городской инфраструктуры используются различные конструкционные материалы. Это могут быть металлы, пластик, бетон, а также дерево в широком ассортименте. Следовательно, и процессы армирования различных изделий будут отличаться рядом специфических особенностей, определяющих качество и эффективность результата проделанных работ. Эти особенности также влияют как на надёжность и долговечность изделий при эксплуатации, так и на их потребительские и эстетические свойства. Такие отличительные особенности, как и многие другие условия технических приёмов процесса армирования, важно заранее знать и учитывать. Этому успешно способствуют современные информационные техно-

Своевременное проведение на трубопроводных системах ремонтно-восстановительных работ — одно из путей решения задач эффективной эксплуатации подобных систем

логии, позволяющие использовать данные о состоянии объекта, процесса или явления, накопленные знания мировой наукой и практикой.

В связи с этим, например, в новой версии 5.5 ПО COMSOL Multiphysics усовершенствован модуль Composite Materials. Теперь интерфейс Layered Shell совместно с интерфейсами Solid Mechanics и Shell позволяет моделировать соединение слоистых оболочек с твёрдыми телами и оболочками. Таким образом, возможно моделирование процесса армирования деталей углепластиком с предварительной оценкой распределения напряжений и деформаций при силовом соединении ламината углепластика с твёрдой подложкой. При этом также доступна визуализация с высокой точностью и достоверностью характеристик состояния слоёв углепластика в ламинате [5]. Это важно, так как одной из проблем силового соединения многих тонких пластин и оболочек является повышенная деформация их кромок. А в данном случае это может привести к нежелательному краевому эффекту, способствующему со временем началу локального процесса расслаивания ламината и, как следствие, отказу работоспособности изделия в целом [5–8].

Представленный в статье материал является результатом анализа подобных исследований и собственных разработок методами моделирования и исследования функциональных характеристик изделий из углепластика, включая поиск путей повышения надёжности и долговечности при эксплуатации [8–9].

УДК 678.8. Научная специальность: 05.23.03.

Моделирование в COMSOL Multiphysics условий армирования углепластиком изделий для ЖКХ

В. А. Сучилин, д.т.н., профессор; **А. С. Кочетков**, старший преподаватель; **Н. Н. Губанов**, старший преподаватель, Российский государственный университет туризма и сервиса (РГУТиС)

Высокие функциональные характеристики углеволокна дают основание считать его универсальным конструкционным материалом, который можно использовать в оборудовании для восстановления прочности деталей, в инфраструктуре ЖКХ для решения задач строительства, ремонта и реставрации сооружений. При анализе процессов армирования углепластиком сделаны выводы, что недостаточная изученность подобных задач обуславливает необходимость их моделирования. Предложена соответствующая методика моделирования в ПО COMSOL Multiphysics.

Ключевые слова: углепластик, армирование, функциональные характеристики, краевой эффект, компьютерное моделирование.

UDC 678.8. The number of scientific specialty: 05.23.03.

Modeling in COMSOL Multiphysics of conditions for reinforcing of carbon fiber products for housing and communal services

V. A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **A. S. Kochetkov**, senior lecturer; **N. N. Gubanov**, senior lecturer, Russian State University of Tourism and Service (RSU TS)

The high functional characteristics of carbon fiber give reason to consider it a universal structural material that can be used in equipment to restore the strength of parts, in the housing and communal services infrastructure for solving the problems of construction, repair and restoration of structures. When analyzing the processes of carbon fiber reinforcement, it was concluded that the insufficient knowledge of such problems necessitates their modeling. The corresponding modeling technique in COMSOL Multiphysics software is proposed.

Key words: carbon fiber reinforced plastics, reinforcement, functional characteristics, edge effect, computer simulation.

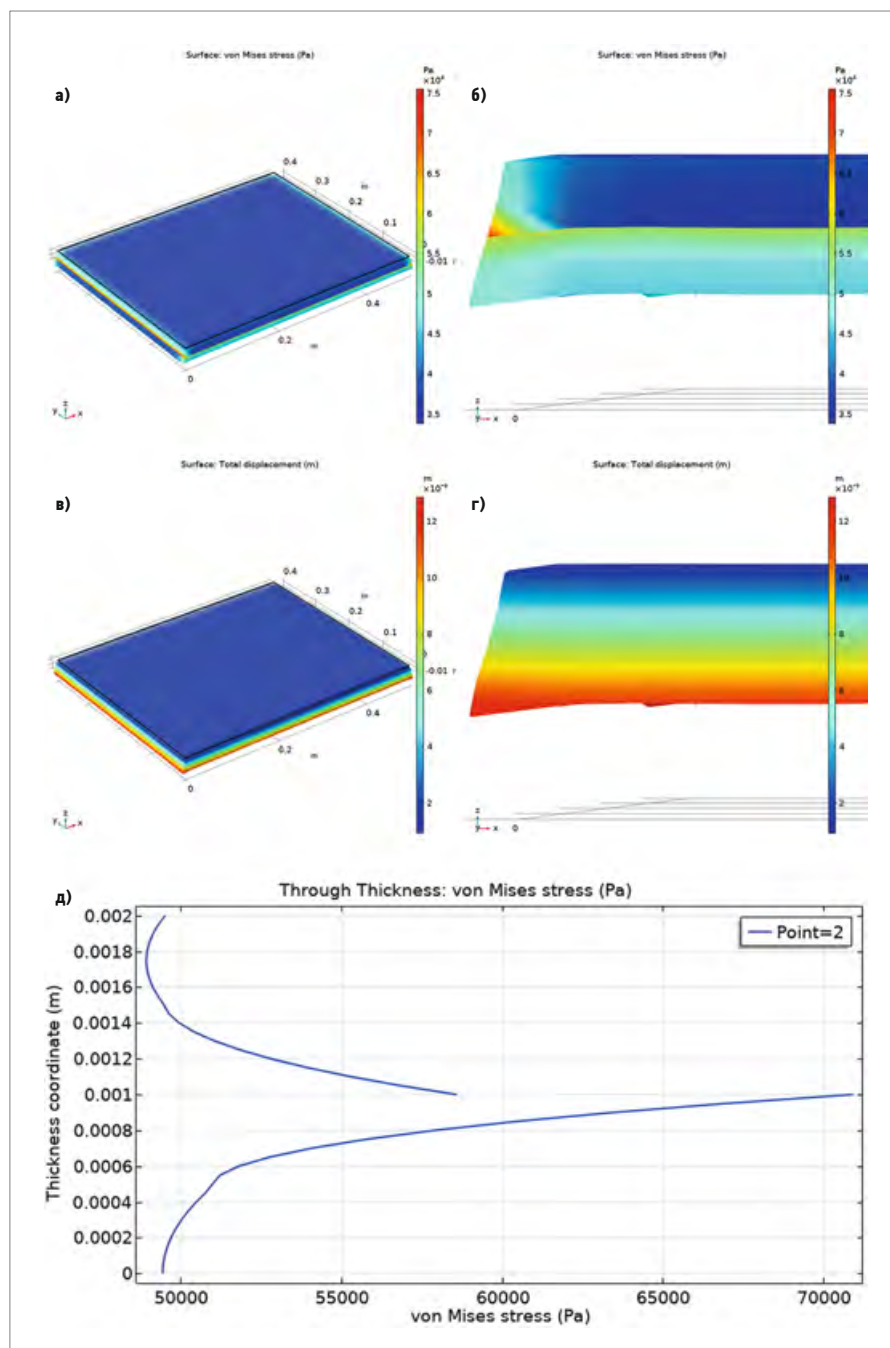


Рис. 1. Исследование условий армирования стальной подложки углепластиком (модель 1) [а — распределение напряжений по Мизесу в слоях ламината, б — то же в проекции вдоль направления оси Oy (фрагмент в увеличенном масштабе), в — распределение деформации в слоях ламината, г — то же в проекции вдоль направления оси Oy (фрагмент в увеличенном масштабе), д — распределение напряжений по Мизесу по толщине в передней правой краевой области ламината]

В геометрии модели слоистая оболочка выполнена из углеродного волокна и эпоксидной смолы. Свойства гомогенизированного ортотропного материала включают механические характеристики, приведённые в таблице исходных параметров модели, а параметры твёрдого тела (подложки) соответствуют конструкционной стали. Плоские размеры подложки в виде прямоугольника ($0,4 \times 0,5$ м) равны размерам пластины ламината.

Ограничения оболочки по отношению твёрдого тела обеспечиваются приложенной к ней нормально направленной нагрузкой, твёрдое тело фиксируется как неподвижный элемент.

Обычно углепластик крепится к твёрдой подложке с помощью адгезива на основе эпоксидной смолы с последующим приложением силы. В зависимости от габаритов изделия (детали) и пространственного расположения армированной поверхности силовое воздействие на ламинат может осуществляться, например, с помощью нормально направленной равномерно-распределённой нагрузки по поверхности (прессование) или приложением нормально направленной равномерно-сосредоточенной нагрузки. Последняя чаще всего реализуется при перемещении вдоль ламината, что характерно для процесса армирования (прикатывание)

с помощью прижимного валика. Важно также учитывать в структуре ламината разное количество слоёв и различные ориентации волокон в слоях, влияющие на распределение напряжений и деформаций в ламинате при армировании [6–8].

Априори можно предположить, что при равномерном распределении напряжений и равномерной деформации слоёв ламината при армировании можно рассчитывать на качество крепления ламината к подложке, следовательно, будет обеспечена эффективность процесса армирования, а также надёжность и долговечность изделия при эксплуатации.

Исследование состояния ламината при армировании стальной подложки углепластиком методом прессования представлено на модели 1, а результаты показаны на рис. 1. Сила, приложенная к верхней поверхности ламината, равна 10 кН; ламинат состоит из двух слоёв с послойной укладкой снизу вверх относительно оси Ox [$0^\circ/90^\circ$].

Силовое воздействие на ламинат может осуществляться с помощью нормально направленной равномерно-распределённой нагрузки

На рис. 1а показано распределение напряжений по Мизесу в слоях ламината. Видно, что напряжение на свободных поверхностях нижнего и верхнего слоёв ламината равномерно и равно примерно $3,5 \times 10^4$ Па, что создаёт необходимые условия для соединения ламината с твёрдой подложкой с помощью адгезива. Однако на краях ламината между слоями в области кромок наблюдается повышение напряжения до 5×10^4 и 7×10^4 Па.

Более наглядно это иллюстрируется на рис. 1б, где показан фрагмент ламината в увеличенном масштабе в проекции вдоль направления оси Oy . Видно также, что кромка нижнего слоя сместилась влево (такое же смещение правой кромки на фрагменте не показано), в то время как кромки верхнего слоя практически остались без смещения. Это явление можно объяснить снижением упругости волокон углепластика нижнего слоя ламината с ориентацией 0° при действии нормально направленной нагрузки через волокна верхнего слоя с ориентацией 90° . Полученное явление нежелательно, так как при армировании конструкции с данными показателями состояния ламината может негативно отразиться на качестве изделия при эксплуатационной нагрузке [6].

На рис. 1в отображена деформация слоёв ламината. Видно, что упругая деформация от действия приложенной нагрузки на свободных поверхностях нижнего и верхнего слоёв равномерна и составляет 10×10^{-9} и $3,5 \times 10^{-9}$ м, соответственно. В целом деформация слоёв незначительная. Однако, при рассмотрении фрагмента ламината в увеличенном масштабе в проекции вдоль направления оси Oy , на рис. 1г также видно смещение нижнего слоя ламината, объясняющее явление неравномерности деформации слоёв при практически равном напряжении в них, особенно в зоне кромок между слоями (рис. 1б). Как было уже отмечено выше, это нежелательное явление, которое на реальном изделии может привести к краевому эффекту, характерному для слоистых материалов при воздействии определённого вида нагрузок [6].

В связи с выявлением при анализе напряжений и деформаций в слоях ламината возможности возникновения краевого эффекта проведена оценка напряжения по Мизесу по толщине ламината на краю слоёв в зоне кромок. На рис. 1д показано распределение напряжения по Мизесу в передней правой краевой области. Приложение нормально направленной нагрузки к верхнему слою ламината приводит к тому, что после некоторой неустойчивости напряжения в зоне 5×10^4 Па оно плавно растёт и достигает примерно $5,8 \times 10^4$ Па на границе с нижним слоем. В нижнем же слое напряжение сразу приобретает максимальное значение 7×10^4 Па, далее плавно падает до $5,2 \times 10^4$ Па. С этого момента напряжение в нижнем слое становится неустойчивым и на границе с твёрдой подложкой равно примерно $4,9 \times 10^4$ Па.

Скачкообразное изменение напряжения в слоях ламината в зоне кромок можно объяснить возникновением неравномерности упругих свойств углепластика с ориентацией слоёв $[0^\circ/90^\circ]$ на краях ламината при армировании с помощью операции прессования, что может быть причиной краевого эффекта при эксплуатации реального изделия.

Дальнейшее исследование характеристик состояния ламината при армировании стальной подложки углепластиком проводилось на модели 2. Модель 2 отражает процесс армирования углепластиком методом прикатывания валиком слоёв ламината к стальной подложке. Результаты исследования показаны на рис. 2.

Ламинат также состоял из двух слоёв с послойной укладкой снизу вверх относительно оси Ox $[0^\circ/90^\circ]$. Приложенная нагрузка от прижимного валика являет-

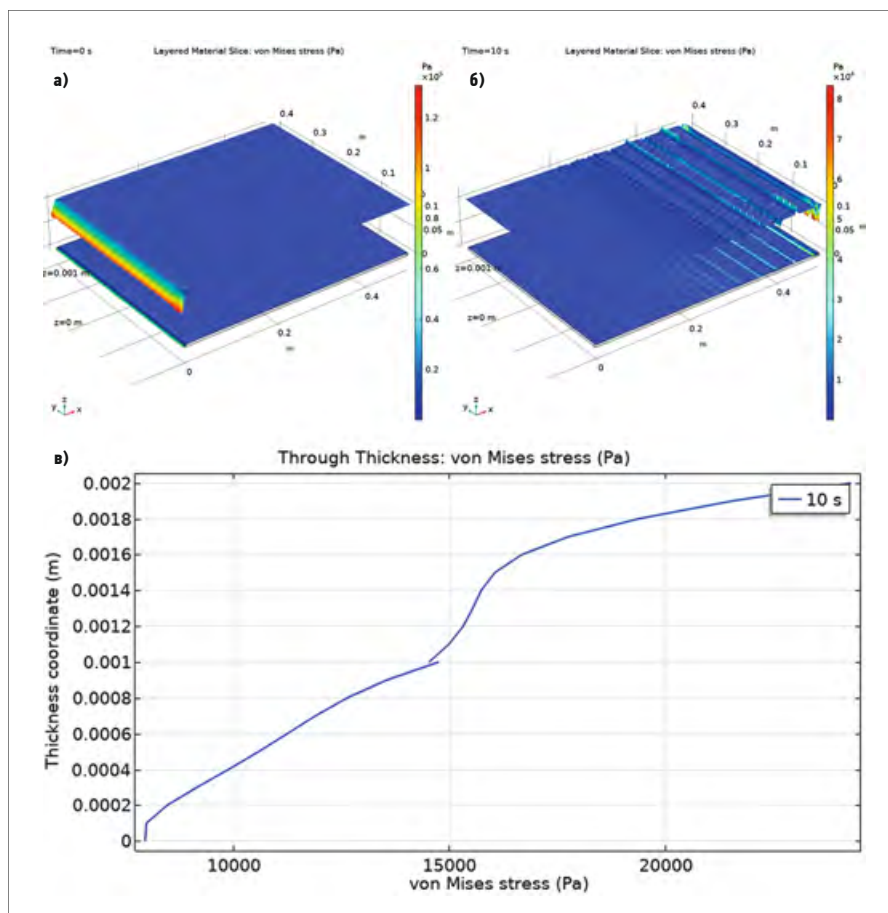


Рис. 2. Исследование условий армирования стальной подложки углепластиком (модель 2) [а — распределение напряжений по Мизесу в слоях ламината при начальном крайнем левом положении прижимного валика (время 0 с); б — то же при крайнем правом положении валика (время 10 с), в — распределение напряжения по Мизесу по толщине в дальней правой краевой области ламината]

ся нормально-направленной равномерно сосредоточенной силой на узкой прямоугольной площадке размером 5×400 мм, получающей перемещение вдоль ламината по оси Ox . Прижимной валик предполагается закреплённым на исполнительном звене манипулятора, что обеспечивает ему качение с постоянной скоростью перемещения 5 см/с и силой прижатия к ламинату 100 Н.

Условием качества крепления ламината к подложке при армировании методом прикатывания валиком и, следовательно, надёжности и долговечности изделия при эксплуатации также является обеспечение равномерности напряжения и деформации на поверхностях слоёв ламината.

Скачкообразное изменение напряжения в слоях ламината в зоне кромок можно объяснить возникновением неравномерности упругих свойств углепластика с ориентацией слоёв $[0^\circ/90^\circ]$ на краях ламината при армировании с помощью операции прессования

На рис. 2а показано распределение напряжения по Мизесу на нижних поверхностях слоёв ламината при начальном положении прижимного валика (время движения валика 0 с). Слои для наглядности отделены друг от друга. Видно, что под валиком напряжение на нижней поверхности верхнего слоя в целом равномерное и равно примерно $1,2 \times 10^5$ Па с небольшим увеличением к краям, а напряжение на поверхности нижнего слоя в зоне действия прижимного валика меньше, также в целом равномерно распределено и равно примерно $0,2 \times 10^5$ Па. Вслед за этим валик начинает качение вдоль оси Ox с постоянной силой давления на ламинат.

На рис. 2б показано распределение напряжения по Мизесу на поверхностях слоёв ламината при конечном положении прижимного валика на правом конце ламината (время движения валика 10 с). Видно, что силовое действие прижимного валика передавалось через верхний слой на нижний, образуя на них распределение деформации в виде упругих поперечных волн. Напряжения в конечном положении валика на нижней поверхности верхнего слоя и нижней поверхности нижнего слоя примерно равны 4×10^4 Па.

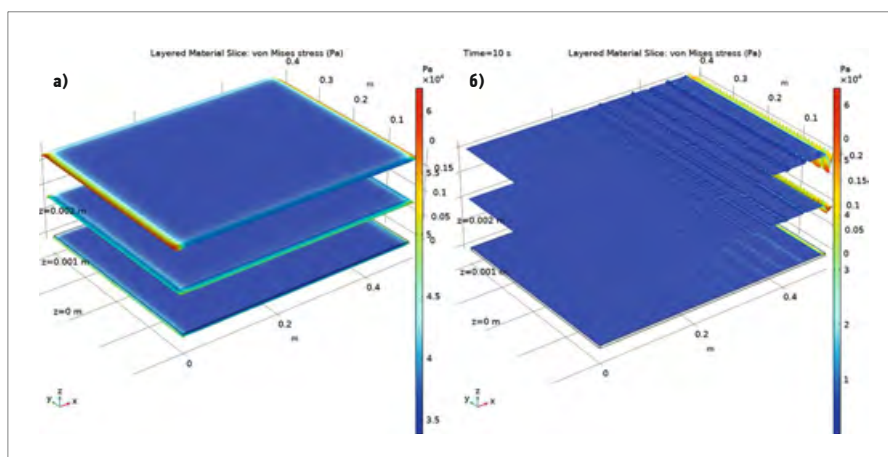


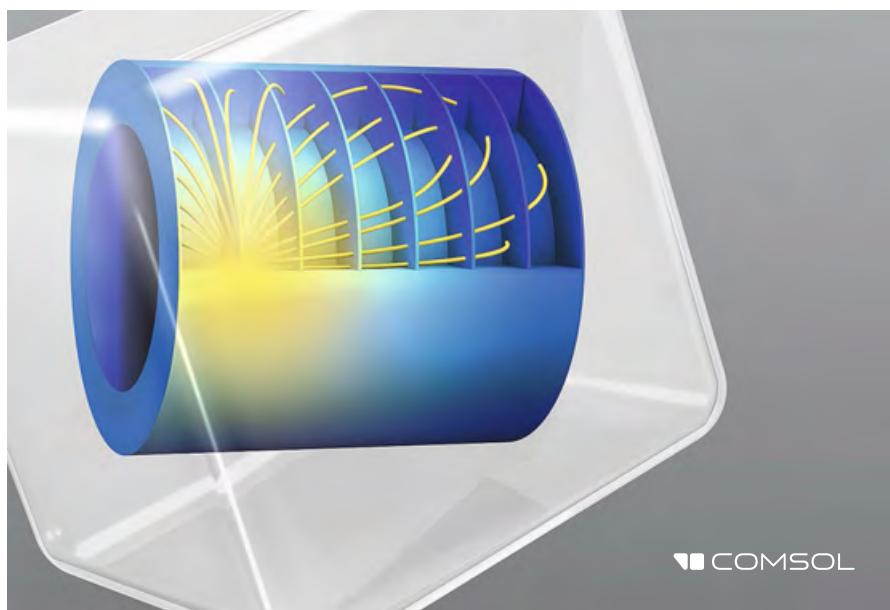
Рис. 3. Исследование условий армирования стальной подложки углепластиком (модель 3) [а — распределение напряжений по Мизесу на нижних поверхностях слоёв ламината (способ прессования), б — распределение напряжений по Мизесу в слоях ламината при крайнем правом положении валика (время 10 с, способ прикатывания валиком)]

Видно затухание упругой волны в слоях ламината на предыдущих участках движения прижимного валика, создающее необходимое прилегание нижней поверхности нижнего слоя к металлической подложке, что будет способствовать хорошему соединению ламината с твёрдой подложкой с помощью адгезива. Однако в области угловых кромок ламината (справа и слева по оси Oy) в верхнем слое напряжение значительно выше 8×10^4 Па, что и в этом случае может быть причиной краевого эффекта при эксплуатации реального изделия.

В связи с выявлением при исследовании напряжений в слоях ламината участков с возможным возникновением краевого эффекта при эксплуатации изделий, армированных данным ламинатом, проведена оценка напряжения по Мизесу по толщине ламината на краю слоёв в зоне кромок. На рис. 2в показано распределе-

ние напряжения по Мизесу по толщине в дальней правой краевой области. Видно, что при приложении нормально направленной нагрузки от прижимного валика к поверхности верхнего слоя в нём возникает напряжение $2,4 \times 10^4$ Па, которое падает на конце слоя до $1,5 \times 10^4$ Па. То же значение напряжения передаётся на поверхность нижнего слоя и падает в нём до $0,8 \times 10^4$ Па на границе с металлической подложкой. Падение напряжения в верхнем и нижнем слоях на краях ламината показывает снижение упругой связи кромок в слоях и с твёрдой подложкой и подтверждает приведённые выше результаты.

Продолжение исследования характеристик состояния ламината при армировании стальной подложки углепластиком проводилось на модели 3. Модель 3 отражает процесс армирования трёхслойного ламината методами прессования и прикатывания прижимным валиком.



Ламинат состоит из трёх слоёв с послойной укладкой снизу вверх относительно оси Ox [$0^\circ/45^\circ/90^\circ$]. Равномерно-распределённая, приложенная к верхней поверхности ламината сила равна 10 кН.

На рис. 3а показано распределение напряжения по Мизесу на нижних поверхностях слоёв ламината. Слои для наглядности отделены друг от друга. Видно, что напряжения на всех поверхностях слоёв ламината равномерно распределены и равны примерно $3,5 \times 10^4$ Па, что создаёт хорошие условия для прилегания нижней поверхности нижнего слоя к металлической подложке и будет способствовать надёжному соединению ламината с твёрдой подложкой с помощью адгезива.

Однако на краях ламината в зоне кромок с направлением вдоль оси Oy верхнего слоя напряжение составляет 6×10^4 Па. На всех краях среднего и нижнего слоёв, а также на краях верхнего вдоль оси Ox оно составляет примерно $4,5 \times 10^4$ Па.

В связи с выявлением при исследовании напряжений в слоях ламината участков с возможным возникновением краевого эффекта при эксплуатации изделий, армированных данным ламинатом, проведена оценка напряжения по Мизесу по толщине ламината на краю слоёв в зоне кромок

Видно, что на краях ламината волокна углепластика с ориентацией 90° (поперёк оси Ox) передают нагрузку на кромки среднего слоя с небольшим изменением. При этом кромки среднего и нижнего слоёв будут деформироваться (как показано, в частности, на рис. 1б). Это негативно отразится на качестве изделия при эксплуатации, так как изменяются упругие свойства кромок, как потребуют их упрочнения после проведённого армирования на реальном изделии.

На рис. 3б показано распределение напряжения по Мизесу на поверхностях слоёв ламината при положении прижимного валика на конечном участке ламината (время движения валика 10 с). Условия нагружения ламината от прижимного валика те же, что и на модели 2. Видно, что силовое действие прижимного валика передавалось через верхний слой на средний и нижний, образуя на них распределение деформации в виде упругих поперечных волн. Напряжение при конечном положении валика на нижних поверхностях слоёв равномерно и составляет 1×10^4 Па.

Видно затухание упругой волны в слоях ламината на предыдущих участках движения прижимного валика, что создаёт условия для хорошего прилегания нижней поверхности нижнего слоя к металлической подложке и будет способствовать надёжному соединению ламината с твёрдой подложкой с помощью адгезива. Однако на краю ламината напряжение меняется от 2×10^4 Па в нижнем слое и до $5,2 \times 10^4$ Па в верхнем, что и в этом случае является нежелательным явлением.

Далее исследование характеристик состояния ламината при армировании стальной подложки углепластиком проводилось на модели 4. Модель 4 отражает процесс армирования пятислойного ламината методами прессования и прикатывания прижимным валиком. Ламинат состоит из пяти слоёв с послойной укладкой снизу вверх относительно оси Ox [$0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ$]. Сила, равномерно-распределённая, приложенная к верхней поверхности ламината, равна 10 кН. На рис. 4а показано распределение напряжения по Мизесу на нижних поверхностях слоёв ламината. Слои для наглядности отделены друг от друга. Видно, что напряжение на всех поверхностях слоёв ламината равномерно и равно примерно 4×10^4 Па. Это создаёт хорошие условия для прилегания нижней поверхности нижнего слоя к металлической подложке и будет способствовать надёжному соединению ламината с твёрдой подложкой с помощью адгезива.

Однако на краях ламината с направлением вдоль оси Ox первого и третьего сверху слоёв напряжение составляет 6×10^4 Па, а на втором слое — 7×10^4 Па. На всех других краях ламината оно равно примерно $4,5 \times 10^4$ Па. На рост напряжения на краях ламината дополнительно оказывают влияние слои с направлением волокон 45° и -45° во втором и четвёртом слоях. На краях с повышенным напря-

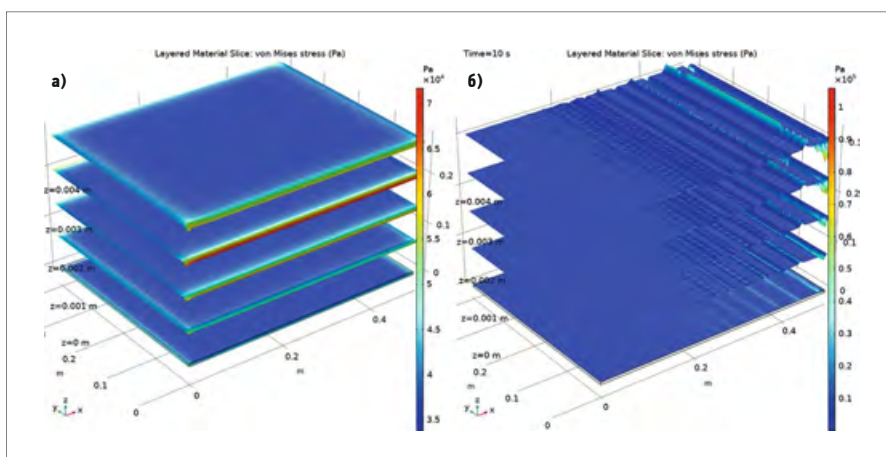


Рис. 4. Исследование условий армирования стальной подложки углепластиком (модель 4) [а — распределение напряжений по Мизесу на нижних поверхностях слоёв ламината (способ прессования), б — распределение напряжений по Мизесу в слоях ламината при крайнем правом положении валика (время 10 с, способ прикатывания валиком)]

жением также будут изменяться упругие свойства, что потребует упрочнения их после проведённого армирования на реальном изделии.

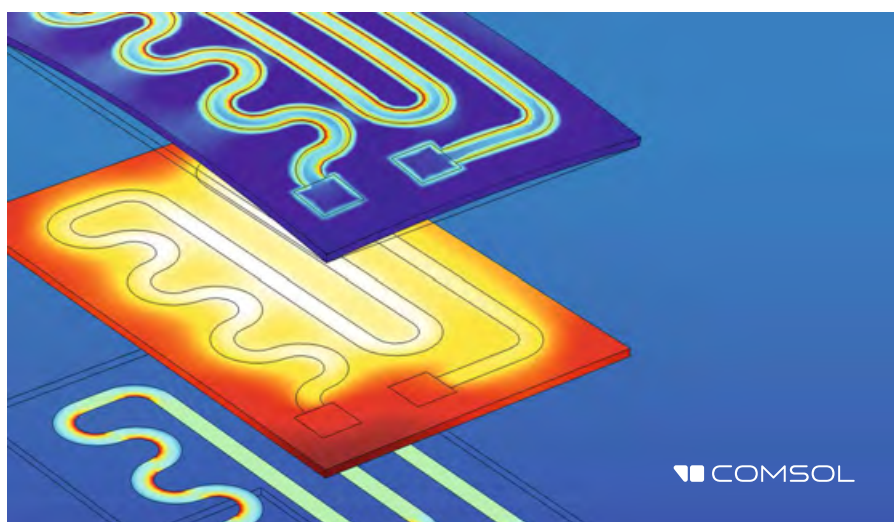
На рис. 4б показано распределение напряжения по Мизесу на поверхностях слоёв ламината при положении прижимного валика на конечном участке ламината (время движения валика 10 с). Условия нагружения ламината от прижимного валика те же, что и на модели 3. Видно, что силовое действие прижимного валика передавалось через верхний слой и средние слои на нижний, образуя на них деформацию в виде упругих поперечных волн.

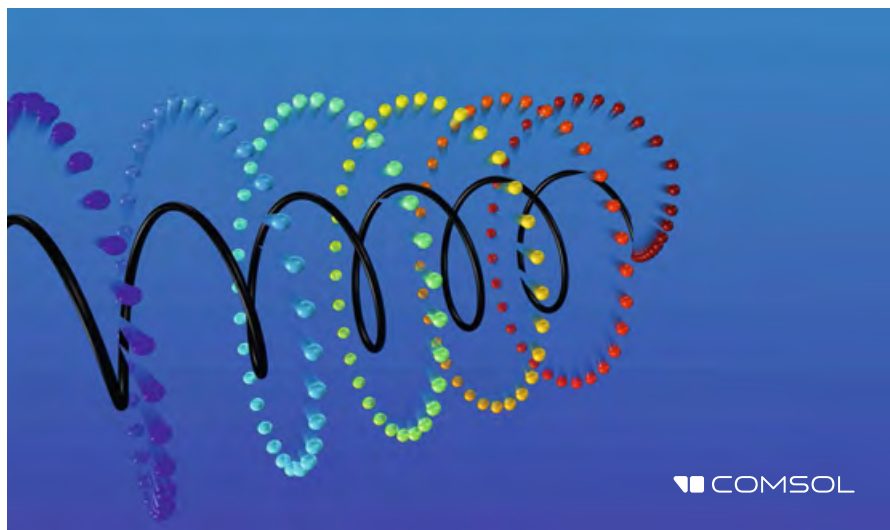
Значительное расхождение в напряжении в верхнем и нижнем слоях показывает необходимость применять в многослойных ламинатах дозированное нагружение верхнего слоя в зависимости от количества слоёв углепластика

Напряжение при конечном положении валика на нижних поверхностях слоёв равномерно и составляет $0,1 \times 10^5$ Па. Видно затухание упругой волны в слоях ламината на предыдущих участках движения прижимного валика, что создаёт хорошие условия для прилегания нижней поверхности нижнего слоя к металлической подложке и будет способствовать надёжному соединению ламината с твёрдой подложкой с помощью адгезива.

Однако на краю ламината напряжение меняется от $0,1 \times 10^5$ Па в нижнем слое до 1×10^5 Па в верхнем. Значительное расхождение в напряжении в верхнем и нижнем слоях показывает необходимость применять в многослойных ламинатах дозированное нагружение верхнего слоя в зависимости от количества слоёв углепластика, что позволит создавать надёжное прилегание нижнего слоя и, следовательно, всего ламината к твёрдой подложке.

Результаты моделирования условий армирования стальной подложки ламинатом разной структуры показывают снижение упругости волокон углепластика на краях ламината в зависимости от количества слоёв и ориентации волокон в слоях. Для обеспечения качества и эффективности работ по армированию изделий углепластиком необходимы разработки и применение способов укрепления кромок ламината после проведения процесса армирования на твёрдой подложке реальных изделий. Возможно применение известных в науке и практике способов, например, используемых при устранении краевого эффекта на слоистых материалах [6]. В этом случае может применяться нанесение изотропного слоя материала на кромки ламината (например, адгезива на основе эпоксидной смолы) или укрепление кромок специальной оснасткой.





Заключение

1. Высокие механические и эксплуатационные характеристики углеволокна дают право считать его универсальным конструкционным материалом, который можно использовать как для производства изделий, так и армирования конструкций любой сложности и самой разнообразной конфигурации. Это открывает широкие возможности применения его в оборудовании для сохранения или восстановления прочности деталей и опорных элементов, а также в инфраструктуре бытового и коммунального хозяйства для решения задач строительства, ремонта и реставрации зданий и сооружений.

2. Процессы армирования углепластиком разных по назначению изделий, как правило, отличаются техническими особенностями и специфическими требованиями, определяющими качество и эффективность результатов проделанных работ, влияющими на надёжность и дол-

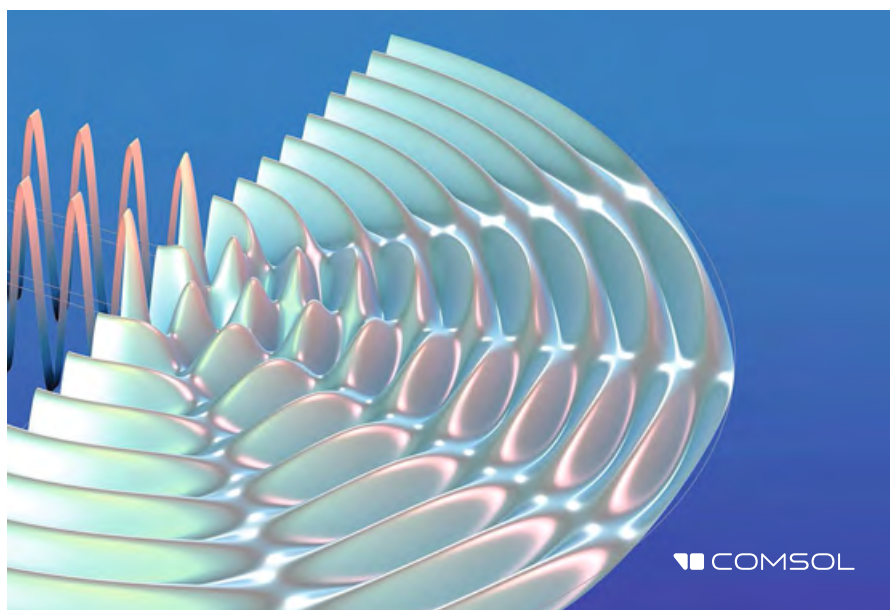
говечность изделий при эксплуатации. Эти отличительные особенности и многие другие условия технологических приёмов процесса армирования важно заранее знать и учитывать.

3. Инновационность и малоизученность задач армирования изделий углепластиком обуславливают необходимость прогнозирования состояния слоёв ламината под действием армирующей нагрузки, этой задаче соответствуют возможности новой версии ПО COMSOL Multiphysics, позволяющей осуществлять оценку характеристик процесса армирования ламинатом углепластика твёрдых конструктивных элементов.

4. Результаты численного моделирования условий армирования стальной подложки многослойным углепластиковым ламинатом с заданной нормально-направленной и равномерно-распределённой нагрузкой (метод прессования при армировании), а также нормально-направленной и рав-

номерно-сосредоточенной нагрузкой при действии движущего прижимного валика (метод прикатывания валиком при армировании) показывают, что распределение напряжения по Мизесу на свободных поверхностях нижних и верхних слоёв ламинатов равномерно, что создаёт необходимые условия для соединения ламината с твёрдой подложкой с помощью адгезива. Однако на краях ламинатов между слоями в области кромок наблюдается повышение напряжения. Причём напряжение распределяется неравномерно по слоям, что приводит в отдельных слоях к повышенной деформации и к снижению упругости волокон углепластика на краях ламината.

5. Для обеспечения качества и эффективности работ по армированию изделий углепластиком необходимы разработки и применение способов укрепления кромок ламината после проведения процесса армирования на твёрдой подложке реальных изделий. При этом возможно применение известных в науке и практике способов усиления кромок ламината, применяемых при устранении краевого эффекта на слоистых материалах, например, путём установки твёрдого каркаса, предотвращающего расслоение ламината, или путём нанесения изотропного слоя материала на свободные кромки ламината, например, адгезива на основе эпоксидной смолы, который использовался для процесса армирования. ●



1. Клябов 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. С. 3–33.
2. Усиление конструкций углеволокном [Электр. текст]. ООО «Проектно-строительная компания Сигма-Ф». Режим доступа: sigma-f.ru. Дата обращения: 17.02.2020.
3. Композитные материалы: почему Москва плетётся в хвосте технического прогресса [Электр. ресурс]. «Строительство.RU». Режим доступа: rctmm.ru. Дата обращения: 17.02.2020.
4. Колпачков Е.Д., Петрова А.П., Курносое А.О., Соколов И.И. Методы формирования изделий авиационного назначения из ПКМ (обзор) // Труды ВИАМ, 2019. №11. С. 22–36.
5. COMSOL Multiphysics User's Guide: Connecting layered shells with solids and shells. Web-source: comsol.com. Access data: February 17, 2020.
6. Дударьков Ю.И., Левченко Е.А., Лимонин М.В. Влияние структуры пакета на краевые эффекты в слоистых композитах // Исследования наукограда, 2014. №3. С. 25–30.
7. Муиземнек А.Ю., Карташова Е.Д. Механика деформирования и разрушения полимерных слоистых композиционных материалов: Учеб. пособие. — Пенза: Изд-во ПГУ, 2017. 56 с.
8. Нелюб В.А. Высокопрочные углепластики на основе эпоксидной матрицы с регулируемым адгезионным взаимодействием: Дисс. канд. техн. наук по спец. 05.17.06. — М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. 157 с.
9. Сушили В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование в COMSOL Multiphysics функциональных характеристик труб для ЖКХ из композитных материалов // Журнал С.О.К., 2019. №11. С. 37–41.

References — see page 78.

Modeling in COMSOL Multiphysics of conditions for reinforcing of carbon fiber products for housing and communal services. Pp. 26–31.

Vladimir A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Alexey S. Kochetkov**, senior lecturer; **Nikolay N. Gubanov**, senior lecturer, Russian State University of Tourism and Service (RGUTS)

1. E.N. Kablov. *Innovacionnye razrabotki FGUP "VIAM" GNTS RF po realizacii "Strategicheskikh napravlenij razvitiya materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda"* [Innovative developments of Federal State Unitary Enterprise "All-Russian scientific research institute of aviation materials" State Research Center of the Russian Federation on the implementation of the "Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030"]. *Aviacionnye materialy i tehnologii* ["Aviation materials and technologies" Magazine]. 2015. No. 1. Pp. 3–33. [In Russian]
2. *Usilenie konstrukcij uglevoloknom* [Carbon fiber reinforcement for structures]. OOO "Proektno-stroitel'naja kompanija Sigma-F" ["Design and construction company Sigma-F", LLC]. Web-source: sigma-f.ru. Access data: February 17, 2020. [In Russian]
3. *Kompozitnye materialy: pochemu Moskva pletetsja v hvoste tehničeskogo progressa* [Composite materials: why Moscow city is lagging behind technological progress]. *Stroitelstvo.ru*. Web-source: rcmm.ru. Access data: February 17, 2020. [In Russian]
4. E.D. Kolpachkov, A.P. Petrova, A.O. Kurnosov, I.I. Sokolov. *Metody formovaniya izdelij aviacionnogo naznachenija iz PKM (obzor)* [Methods of molding aviation products from polymer composite materials (PCM): An overview]. *Trudy VIAM* [Proc. of the All-Russian Institute of Aviation Materials]. 2019. No. 11. Pp. 22–36. [In Russian]
5. COMSOL Multiphysics User's Guide: Connecting layered shells with solids and shells. Web-source: comsol.com. Access data: February 17, 2020.
6. Ju.I. Dudar'kov, E.A. Levchenko, M.V. Limonin. *Vlijanie struktury paketa na kraevye jeffekty v sloistyh kompozitah* [The effect of the package structure on edge effects in layered composites]. *Issledovaniya naukoğrada* ["Science city research"]. 2014. No. 3. Pp. 25–30. [In Russian]
7. A.Ju. Mujzemnek, E.D. Kartashova. *Mehanika deformirovaniya i razrusheniya polimernyh sloistyh kompozicionnyh materialov: Ucheb. posobie* [The mechanics of deformation and fracture of polymer layered composite materials: A textbook]. Penza. *Izd-vo PGU* [Publishing House of Penza State University]. 2017. 56 p. [In Russian]
8. V.A. Neljub. *Vysokoprochnye ugleplastiki na osnove jepoksidnoj matricy s regulirovannym adgezionnym vzaimodejstviem: Diss. kand. tehn. nauk po spec. 05.17.06* [High-strength carbon plastics based on an epoxy matrix with regulated adhesive interaction: The PhD dissertation in the specialty No. 05.17.06]. Moscow. *RHTU im. D.I. Mendeleeva* [Mendeleev Russian University of Chemical Technology]. 2015. 157 p. [In Russian]
9. V.A. Suchilin, A.S. Kochetkov, N.N. Gubanov. *Modelirovanie v COMSOL Multiphysics funkcional'nyh harakteristik trub dlja ZhKH iz kompozitnyh materialov* [Modeling in COMSOL Multiphysics of the functional characteristics of pipes from composite materials for housing and communal services]. *Zhurnal Santehnika, otopenie, kondicionirovanie (S.O.K.)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2019. No. 11. Pp. 37–41. [In Russian]