



Как менискообразный профиль позволяет устранить концентрацию напряжений в угловых точках шва

Обеспечение долговечности монтажного шва требует не только высокого качества используемых материалов, но и оптимизации формы его профиля (поперечного сечения). В нашей статье «Почему нельзя использовать «мениск» в монтажном шве» (выпуск 67, сентябрь 2021) мы теоретически показали, что применение шва менискообразной формы, имеющего тонкую центральную часть, «шейку», приводит к повышенным деформациям и напряжениям в этой тонкой части.

При этом в практике применения «плоского» шва в других областях строительства подрядчики иногда замечают отрывы герметика от стенок (см. рис. 1). Обычно это объясняется некачественно проведенной работой по подготовке поверхности, из-за которой не развивается достаточная прочность сцепления герметика (адгезия).

Но недавно в результате проведенных нами экспериментальных испытаний на разрыв швов различного профиля мы обнаружили, что менискообразный шов может выдерживать даже большее относительное удлинение, чем шов равномерной толщины.



Рис. 1. Фотография «плоского» шва между бетонными плитами. Возник разрыв герметика у одной из стенок шва

Для объяснения полученных экспериментальных результатов, а также выявления преимуществ и недостатков менискообразного шва мы выполнили расчетное моделирование процесса растяжения шва методом конечных элементов. Решалась двумерная задача. Ширина шва L была взята равной 20 мм, максимальная толщина шва

H (у стенок) также равной 20 мм. Границы менискообразного профиля задавались как дуги окружностей, при этом величина мениска определялась следующим отношением:

$$\bar{h} = h/H,$$

где h – толщина шва в «шейке» (см. рис. 2).

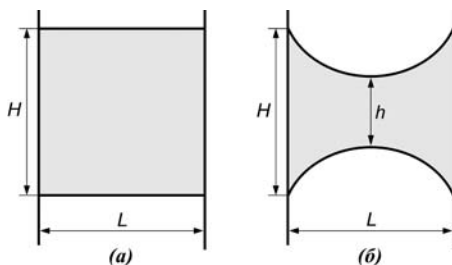


Рис. 2. Принятая форма шва: (а) без мениска; (б) с мениском

При моделировании растяжения профиль шва разбивался на множество (около 1500) четырехугольных элементов, которые видны на рисунках 3 – 5. Были заданы параметры материала, в частности, коэффициент Пуассона равным 0,5, что соответствует отсутствию изменения объема тела при его дефор-

мациях (это характерно для резиноподобных материалов). Далее задавалось условие: смещение правой стенки на 10 мм вправо, то есть расстояние между стенками увеличивалось в 1,5 раза, и рассчитывалось соответствующее напряженное состояние шва. Исходная форма шва и его форма при растяжении в 1,5 раза для менискообразного шва с относительной толщиной «шейки» 0,5 показаны на рисунке 3.

Для растянутого состояния шва цветом отобразена величина локальной относительной деформации. В действительности полная информация об имеющихся деформациях шва может быть передана значениями тензора деформаций в каждой его точке. Тензор деформаций показывает относительное изменение длин сторон и изменение углов между ними для дифференциально малого кубика вещества, расположенного в рассматриваемой точке. Поскольку на рисунке одновременно можно визуализировать лишь одну скалярную величину, показано максимальное значение относительной деформации по главным осям тензора деформаций, то есть по тому направлению, по которому относительная деформация в рассматриваемой точке максимальна по модулю.

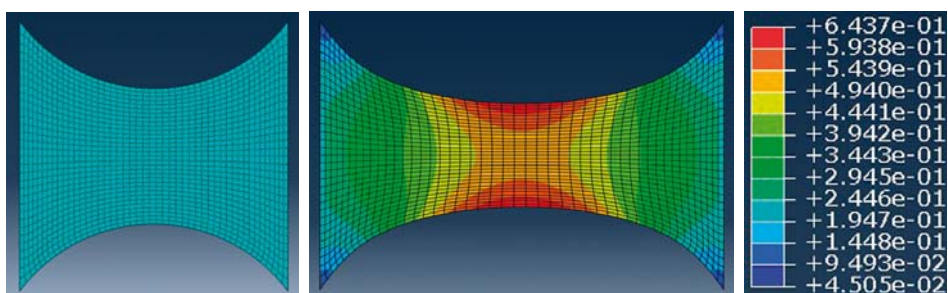


Рис. 3. Менискообразный шов с относительной толщиной «шейки» 0,5: исходная форма и форма после растяжения в 1,5 раза

Из рисунка 3 видно, что максимальные деформации для менiscoобразного шва возникли действительно в «шейке» и составили 64%, хотя расстояние между стенками увеличилось лишь на 50%. То есть наличие мениска действительно приводит к повышению деформаций в центре шва.

А что же происходит для шва равномерной толщины, почему по экспериментальным данным его прочность ниже? Из рисунка 4 видно, что для него величина деформаций в центре приблизительно соответствует изменению расстояния между стенками, однако существенная концентрация напряжений и деформаций наблюдается в угловых точках шва. Именно в этих местах и происходило разрушение шва в экспериментах. По расчету, относительная деформация в углах доходит до 88% (при увеличении расстояния между стенками на 50%). Таким образом, максимальные деформации для шва равномерной толщины в результате концентрации напряжений в углах оказались еще больше, чем для менiscoобразного шва (64%).

Повышенные деформации в угловых точках можно объяснить следующим образом. Для резиноподобных материалов объем при деформациях не меняется. Соответственно, при растяжении шва он стремится сжаться по толщине, что, в частности, видно из расчетных форм растянутого шва. Шов равномерной толщины при растяжении становится тоньше в центре (см. рис. 4). Если бы шов мог скользить вдоль стенки, не отрываясь от нее, то после растяжения мы получили бы равномерно уменьшившийся по толщине шов. Однако края шва жестко соединены со стенкой, в результате возникают дополнительные усилия взаимодействия между материалом шва, стремящимся стянуться к его оси, и удерживающей его стенкой. Это и приводит к дополнительным напряжениям в угловых точках. Данный эффект будет тем интенсивнее, чем больше относительная толщина шва (отношение толщины к ширине).

Важно понимать, что наблюдаемое при испытаниях разрушение шва равномерной толщины в угловых точках не является следствием плохой адгезионной прочности соединения шва со стенкой. Причина разрушения в этих местах — значительная концентрация напряжений вблизи угловых точек.

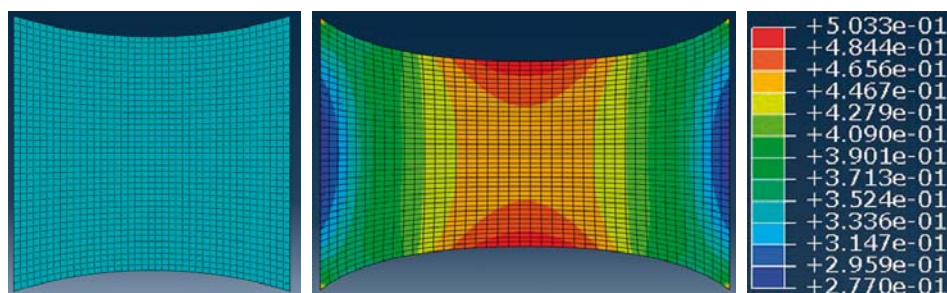


Рис. 5. Те же данные для шва с относительной толщиной «шейки» 0,85

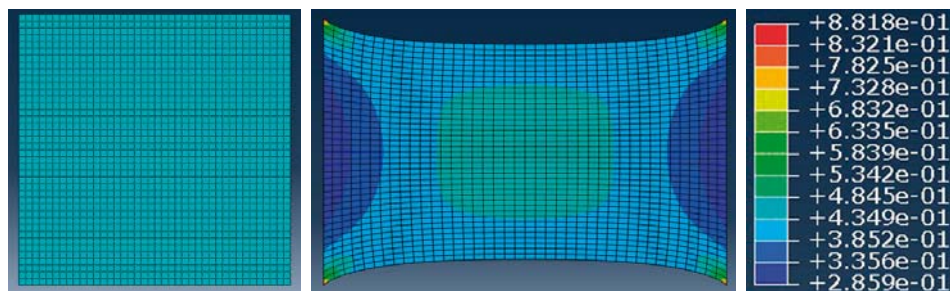


Рис. 4. Те же данные для шва равномерной толщины

Рассмотренный метод расчетного моделирования можно применить для оптимизации относительной толщины мениска шва. Целью оптимизации будем считать минимизацию максимального значения относительной деформации, возникающей в шве. Проведение расчетов при различных значениях относительной толщины «шейки» мениска показало, что ее оптимальное значение составляет около 0,85 (т. е. для шва с максимальной толщиной 20 мм толщина «шейки» должна составлять 17 мм). Соответствующие данные приведены на рисунке 5. Видно, что при такой толщине «шейки» значения деформаций в центре шва и в угловых точках практически совпадают и соответствуют изменению расстояния между стенками.

Таким образом, применение шва равномерной толщины может приводить к снижению его прочности из-за значительной концентрации напряжений и деформаций в угловых точках шва. Эта концентрация напряжений может быть устранена путем использования менiscoобразного профиля шва. При этом достаточно, чтобы толщина центральной части шва была лишь немного (по расчету на 15-20%) меньше, чем у стенок. Дальнейшее уменьшение толщины «шейки» будет приводить к постепенному повышению максимальных деформаций в центральной части шва и снижению его прочности. В частности, использование для проектирования шва формулы $A = B/2$, где A — минимальная толщина шва, B — ширина шва, определенно будет приводить к ухудшению его долговечности.

Кроме того, расчет показывает, что использовать шнуры из вспененного полиэтилена как подложку для нанесения герметика, например, в монтажном шве, нельзя. Возникающий из-за шнура мениск будет

иметь чрезмерно малую толщину «шейки», что неизбежно скажется на эксплуатационных характеристиках такого шва.

В связи с вышесказанным возникает вопрос: почему же в монтажном шве, который делают как раз плоским, и с попытками применить в котором полиэтиленовые шнуры мы боремся последние 20 лет, не возникают разрывы, подобные тем, которые мы видим на рисунке 1? На это есть две причины. Во-первых, нагрузки на слой герметика в монтажном шве определенно меньше, чем в фасадном шве. Во-вторых, в монтажном шве используются в основном акриловые герметики, усадка которых составляет около 15%. То есть форма их шва после усадки герметика как раз и будет идеальной для предотвращения чрезмерных нагрузок в центре шва или в его угловых точках (см. рис. 6).

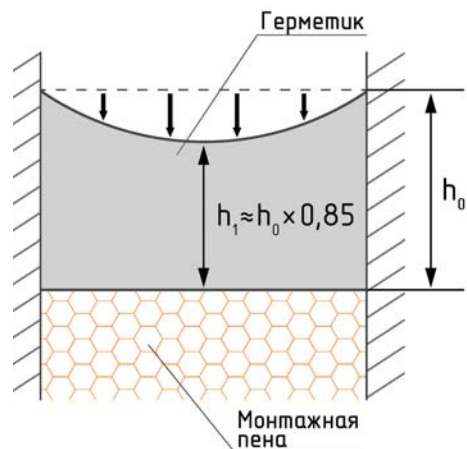


Рис. 6. Форма шва акрилового герметика в монтажном шве. Стрелками показано направление усадки (h_0 — толщина плоского шва герметика до усадки, h_1 — толщина «шейки» шва после усадки)

Губанов Г. А., к. т. н.
Гладков П. С.

Компания «САЗИ»
140005, Московская обл., г. Люберцы,
ул. Комсомольская, 15 А
Тел.: +7 (495) 221-8765, 740-4727
www.sazi-group.ru