

Совершенствование методов определения прочности клеевых соединений на основе численного моделирования

Севодина Н.В., Федоров А.Ю.

Рассмотрены различные варианты испытаний на прочность клеевых соединений и проведен численный анализ напряженного состояния в образцах, используемых в этих испытаниях. Произведено сравнение полученных результатов с принятыми методиками оценки напряженного состояния. На основе поставленной оптимизационной задачи предложены оптимальные варианты геометрии в окрестности особых точек образцов. Подтвержден качественный вывод о том, что у оптимальных поверхностей имеются общие признаки, связанные со структурой решения в вершине соответствующего составного клина, которое определяет характер сингулярных решений в точках поверхности, где имеет место соединение различных материалов с различными условиями на поверхности контакта – идеальное прилипание, сухое трение, скольжение.

Склеивание, как один из традиционных методов скрепления различных элементов конструкций, используется в течение многих веков. Подавляющее большинство клеевых соединений применяется в различных отраслях промышленности: судостроении, авиационной промышленности, ракетно-космической отрасли, автомобилестроении, робототехнике, электронике, промышленности строительных материалов, легкой промышленности. Такое широкомасштабное использование клеевых соединений объясняется простотой их изготовления, низкими материальными и временными затратами, высокой коррозионной и усталостной стойкостью, трещиностойкостью, хорошими характеристиками демпфирования, меньшим весом по сравнению с другими методами скрепления. В качестве примера можно упомянуть о наблюдавшемся вплоть до 2009 года интенсивном увеличении спроса на клеи, применяющиеся в автомобилестроении. Тогда среднее потребление клеев и герметиков составило приблизительно 20 кг на одно транспортное средство [1]. В авиакосмической отрасли все больше количество клеев используется в гражданской авиации, достигая наибольшего уровня в новых авиалайнерах Boeing 787 Dreamliner и Airbus A350, которые более чем наполовину изготовлены из клеевых структур (композиционных материалов) [2]. С увеличением спроса на энергоэкономичные средства доставки, а позже и на энергоэкономичные транспортные средства, возросла потребность в проектировании облегченных конструкций, таких как элементы кузова автомобилей и фюзеляжа воздушных судов.

Все это привело к тому, что методы соединения листовых материалов получили стремительное развитие. Эти методы позволяют скреплять новейшие материалы, которые могут быть разнородными, плохо свариваемыми или иметь покрытие (краска, лак, грунтовка и т.д.). Одним из таких методов является склеивание, преимуществом которого является обеспечение непрерывного распределения напряжений по всей поверхности соединения.

Прочностные свойства клееных конструкций в значительной мере определяются прочностью их клеевых соединений. Однако теоретические основы, технология склеивания и оценки прочности клеевых соединений получили значительное развитие лишь в последние 70 лет [3–5].

Экспериментальные оценки прочности клеевых соединений

Для оценки прочности клеевых соединений при склеивании как одинаковых, так и разных материалов существуют стандартные методы, определенные российскими государственными стандартами (ГОСТами) и зарубежными (международными и национальными, такими как международный ISO, британский BSI, французский AFNOR, немецкий DIN, американский ASTM, японский JIS и многими другими).

Действующие ГОСТы для определения прочности клеевых соединений можно условно разделить, например, по виду нагружения (отрыв, сдвиг, отслаивание, расслаивание) или по типу склеиваемых материалов (одинаковые, разные) (рис. 1).

Образцы, используемые для определения прочности клеевых соединений (как по российским, так и по зарубежным стандартам), имеют различные формы и размеры.

На рис. 2 представлены наиболее типичные варианты образцов, которые используются при определении прочности клеевого соединения одинаковых материалов на отрыв [6], сдвиг [7] и различных материалов (металл – резина) на отрыв [8]. Для этих образцов прочность при отрыве и сдвиге определяется по формуле

$$\sigma = P/F, \quad (1)$$

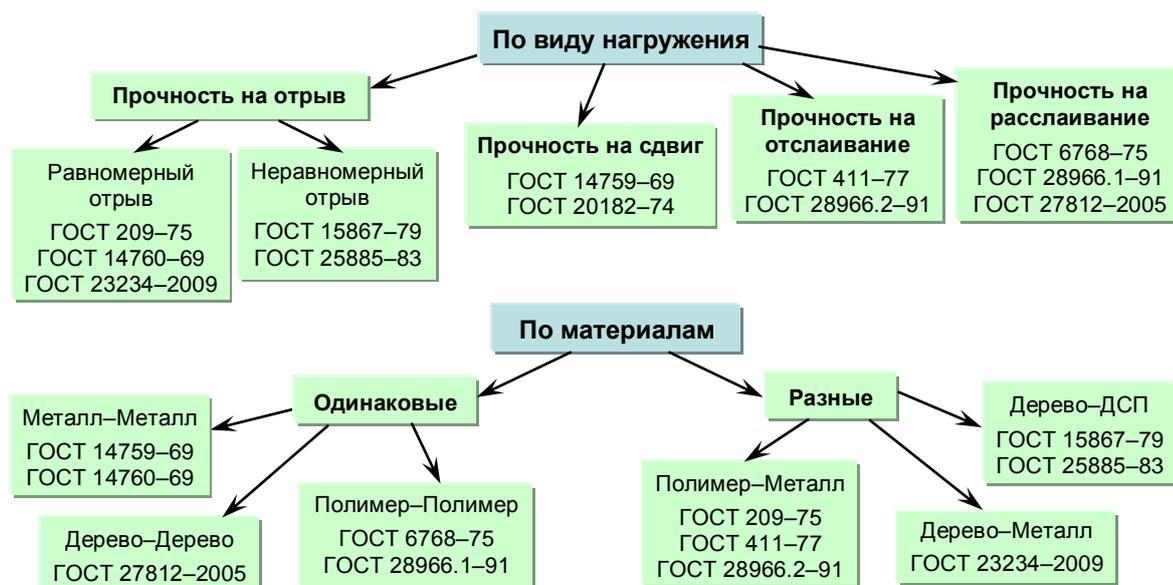


Рис. 1. Классификация действующих ГОСТов для определения прочности клеевых соединений

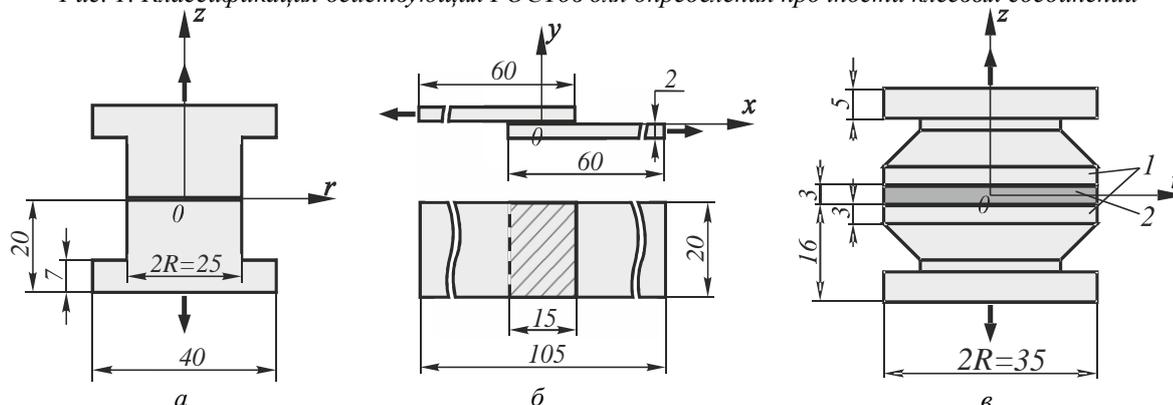


Рис. 2. Форма и размеры (в мм) образцов, которые используются при определении прочности клеевого соединения по ГОСТам: одинаковые материалы, а – отрыв, б – сдвиг; различные материалы, в – отрыв (1 – металлические диски, 2 – резина)

где P – разрушающая нагрузка, F – площадь склеивания.

Применение этой формулы основано на предположении о том, что распределение напряжений по поверхности контакта *материал – клей* является однородным. Но это предположение необоснованно, что доказывается исследованием напряженно-деформированного состояния в клеевом соединении.

Численное моделирование клеевых соединений

Знание напряженно-деформированного состояния в клеевом соединении важно для предсказания его прочности. Для исследования напряженного состояния простых соединений внахлестку существуют аналитические и численные методы. В работе [9] приведен обширный обзор литературы о существующих аналитических моделях для простых и двойных клеевых соединений внахлестку. Среди численных методов наибольшее распространение получил метод конечных элементов, отличающийся своей гибкостью и универсальностью.

Как было отмечено выше, для образцов, представленных на рис. 2, предположение об однородном распределении напряжений по поверхности контакта *материал – клей* не всегда соответствует действительности, что является следствием как экспериментальных, так и теоретических исследований. В математической теории упругости главным аргументом этой необоснованности является то, что имеют место сингулярные решения, связанные с возможностью появления в отдельных точках области, называемых особыми точками, бесконечных значений напряжений. К таким особым точкам относятся, например, точки на поверхности тела, где нарушается гладкость поверхности, меняется тип краевых условий, контактируют различные материалы, или внутренние точки, где имеет место нарушение гладкости поверхности контакта различных материалов. Все эти точки могут иметь место и в расчетных моделях клеевых соединений. Результат теории упругости о бесконечных напряжениях в особых точках отражает наличие в реальном механическом объекте ярко выраженной концентрации напряжений в окрестности особой точки. Как показывают экспериментальные исследования, именно в зонах с ярко выраженной концентрацией напряжений происходит накопление повреждений и начинается процесс разрушения. Наличие сингулярного решения в рассматриваемых задачах определяется геометрией тела, механическими характеристиками и граничными условиями на поверхности контакта.

Для проверки и оценки правомерности использования предположения об однородности распределения напряжений по поверхности склеивания различных материалов при определении их прочности была получена реальная картина распределения напряжений в образцах на основе численного моделирования. Для расчета напряженно-деформированного состояния использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в пакете ANSYS (лицензия 392853). Эффективной оценкой точности полученных численных результатов при решении задачи на основе принципа возможных перемещений является погрешность выполнения естественных краевых условий на свободной от нагрузок боковой поверхности образцов и на поверхности контакта разнородных материалов. В настоящей работе использовались дискретизации, обеспечивающие погрешность выполнения естественных краевых условий менее одного процента вне трех-четырех элементов, прилегающих к особой точке.

Необходимо отметить, что при анализе напряженно-деформированного состояния тел с особыми точками численными методами, в том числе и МКЭ, возникают определенные трудности, связанные с оценкой точности и сходимости решения в окрестности этих особых точек. Использование стандартных процедур МКЭ требует в окрестности особых точек существенного сгущения конечно-элементной сетки, применения сложных адаптивных процедур ее оптимизации. Для этого на основе пакета ANSYS¹ были разработаны адаптивные алгоритмы построения сгущающихся к особым точкам конечно-элементных сеток.

На первом этапе исследования напряженно-деформированного состояния на поверхности контакта *материал – клей* необходимо оценить влияние толщины клеевой прослойки на прочность соединения. Этому вопросу посвящен ряд исследований, среди которых наиболее выделяются работы [10–12].

На рис. 3, а для образца, представленного на рис. 2, а, приведено распределение отрывных напряжений по поверхности контакта *материал – клей* для двух значений толщины слоя клея. Наличие в данном случае сингулярного решения проявляется в том, что распределение напряжений в окрестности края поверхности контакта *материал – клей* имеет существенно неоднородный характер, а на краю поверхности напряжения асимптотически стремятся к бесконечности при увеличении числа конечных элементов. Практически это означает, что окрестность края поверхности контакта материала и клея является зоной ярко выраженной концентрации напряжений. Размеры этой зоны зависят от толщины слоя клея. На рис. 3, б приведено распределение касательных напряжений по верхней границе контакта *материал – клей* для образца, представленного на рис. 2, б.

Для образца, представленного на рис. 2, в, приведено распределение отрывных напряжений по поверхности *металл – резина*, полученное без учета клеевой прослойки (рис. 4) и при добавлении в расчетную схему клеевой прослойки между металлом и резиной (рис. 5).

Результаты расчетов, приведенные на рис. 5, демонстрируют неоднородное распределение напряжений на поверхности контакта *металл – клей* с ярко выраженной концентрацией вблизи внешней боковой поверхности. Изменение толщины клеевой прослойки практически не оказывает влияния на распределение отрывных напряжений.

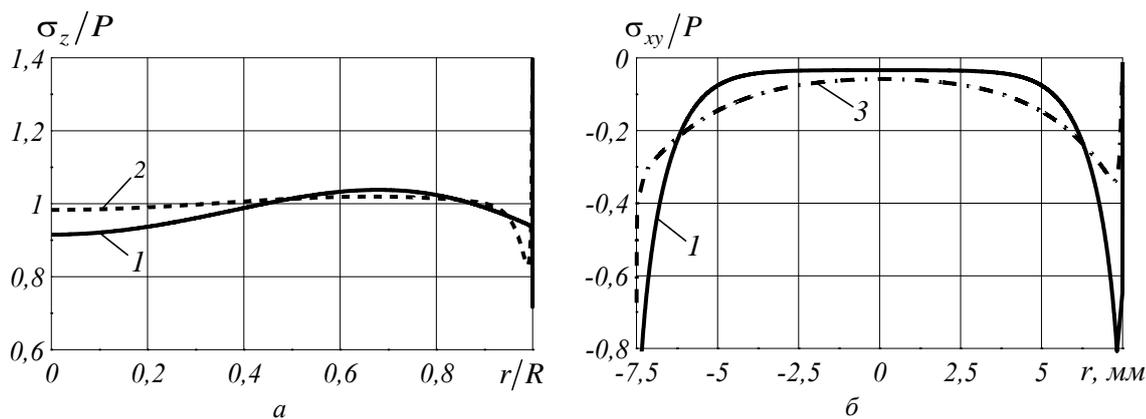


Рис. 3. Распределение напряжений по поверхности контакта *материал – клей* с учетом толщины клеевой прослойки t , мм: 1 – 0,01; 2 – 0,5; 3 – 0,15

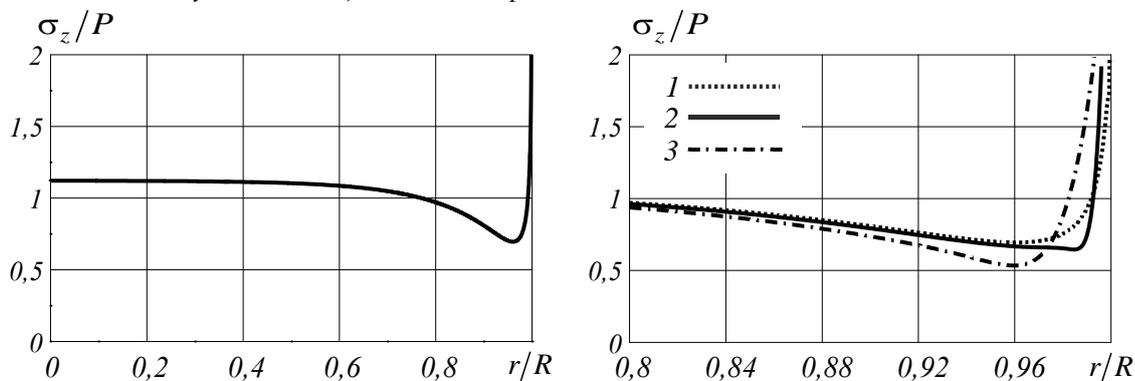


Рис. 4. Распределение отрывных напряжений на поверхности контакта *металл – резина* в случае бесклеевого соединения

Рис. 5. Распределение отрывных напряжений на поверхности контакта *металл – клей* при различных значениях толщины клеевой прослойки: 1 – 0,01 мм, 2 – 0,15 мм, 3 – 0,5 мм

жений по поверхности контакта *клей – резина*. На поверхности *металл – клей* при уменьшении толщины клеевого слоя зона концентрации напряжений в окрестности выхода клеевого слоя на поверхность уменьшается.

Таким образом, наличие концентрации напряжений в некоторых (особых) точках клеевого соединения нарушает однородность распределения напряжений по поверхности склеивания. Именно в этих точках и начинается процесс разрушения испытываемых образцов. Поэтому прочность клеевого соединения, определяемая по формуле (1), применяемой в ГОСТах, приводит к неточным значениям.

Подходы к решению задачи снижения концентрации напряжений вблизи особых точек клеевых соединений

Существуют различные способы, методы и технологические приемы, направленные на увеличение прочности клеевых соединений. Эти подходы связаны с изменением геометрии клеевых соединений и основаны на том, что напряженно-деформированное состояние в зоне концентрации напряжений, а значит вблизи особых точек (линий), зависит от формы поверхности, механических характеристик материала или соотношения механических характеристик соединяемых материалов. Выделим несколько подходов:

1. *Изменение геометрии склеиваемых материалов.* Примером таких изменений служат различные конструктивные решения в области особых точек: галтели, выточки, скосы, скругления и др. Скругление углов устраняет особенность, поэтому малые локальные изменения геометрии имеют значительный эффект. При этом распределение напряжений более однородно, а максимум находится на некотором расстоянии от угла.

2. *Изменение геометрии клея.* Многие исследователи показали, что использование на концах области контакта специально сформированных излишков клея, обеспечивающих плавное сопряжение боковой поверхности клея со свободными гранями склеиваемых материалов, уменьшает концентрацию напряжений в клее и склеиваемом материале.

3. *Формообразование склеиваемых материалов и клея.* К данному подходу относятся различные изменения формы поверхности склеиваемых материалов в окрестности особых точек: скосы, волнообразность и т.д.

Принимая во внимание многообразие технических постановок и затраты, связанные с экспериментальным путем их решения, очевидной становится актуальность задачи поиска оптимального решения путем математического моделирования. Математически выбор того или иного подхода приводит к совершенно естественной постановке задачи оптимизации формы поверхности в окрестности особых точек и поиска значений упругих постоянных, при которых напряженное состояние удовлетворяет заданному прочностному критерию, либо возникающие напряжения являются минимальными из всех возможных конструктивных решений.

Рассмотрим задачу оптимизации для кусочно-однородного тела объема $V = V_1 + V_2$ и ограниченного поверхностью $S = S_1 + S_2$. Здесь нижние индексы обозначают принадлежность к одному из материалов. В данном случае, точки соединения поверхностей S_1 и S_2 являются особыми точками поверхности, где имеет место контакт двух материалов.

Для постановки задачи оптимизации вводится функционал

$$F(S_f) = \int_{S_k} \left[\sigma_n - \frac{1}{S_k} \int_{S_k} \sigma_n ds \right]^2 ds, \quad (2)$$

который определяет среднеквадратическую невязку отклонения (при отрыве – нормальных, при сдвиге – касательных) напряжений σ_n по поверхности контакта S_k материалов от их среднего значения на этой поверхности. Здесь S_f – часть поверхности S в окрестности особой точки, на которую могут быть наложены ограничения конструктивного характера.

Требуется найти поверхность S_f , минимизирующую функционал (2) либо обеспечивающую его значение меньше некоторой заданной величины. Функционал (2) преследует цель нахождения такой формы поверхности S_f , которая бы обеспечивала наиболее однородное распределение напряжений σ_n по поверхности контакта S_k различных материалов. Поэтому, используя данный функционал при поиске новых форм испытательных образцов для определения прочности клеевых соединений, можно получить образцы, для которых применение расчетной формулы (1), используемой в ГОСТах, будет обосновано.

На основе разработанных алгоритмов оптимизации был решен ряд задач по поиску оптимальной формы поверхности составных тел в окрестности особых точек. Решение отыскивается на ограниченном классе поверхностей. В качестве образующих для таких поверхностей могут использоваться кусочно-полиномиальные или другие функции, определенные по значениям координат или производных рассматриваемой функции в конечном числе узловых точек. Результаты решения оптимизационных задач показали, что во многих случаях из всего многообразия видов поверхностей достаточно описание формы поверхности в виде кубического сплайна или дуги окружности, основанных на двух узловых точках. С практической точки зрения это означает, что изготовление изделий с такими формами поверхностей технологически достижимо и предпочтительнее других видов поверхностей.

Общее свойство оптимальных решений

Анализ характера поведения напряжений в окрестности особой точки поверхности, где имеет место соединение двух материалов, связан с рассмотрением задачи исследования собственных решений для составного клина при плоскодеформированном состоянии, который образован касательными к поверхности тела в особой точке [13, 14]. Различные варианты составных клиньев, которые могут встречаться в клеевых соединениях, приведены на рис. 6.

Собственные решения в полярной системе координат с центром в вершине клина имеют следующий вид:

$$u_i(r, \varphi) = r^{\lambda_k} \xi_i^{(k)}(\varphi),$$

где λ_k – собственные значения, которые находятся из соответствующего характеристического уравнения.

Вопрос о возможности наличия или отсутствия сингулярности напряжений в вершине клина решается в зависимости от величины действительных частей собственных значений λ_k : если среди множества собственных значений имеется хотя бы один с действительной частью меньше единицы $\text{Re } \lambda_k < 1$, то в вершине клина возможны бесконечные напряжения. В работах [15–18] предложен один из возможных методов

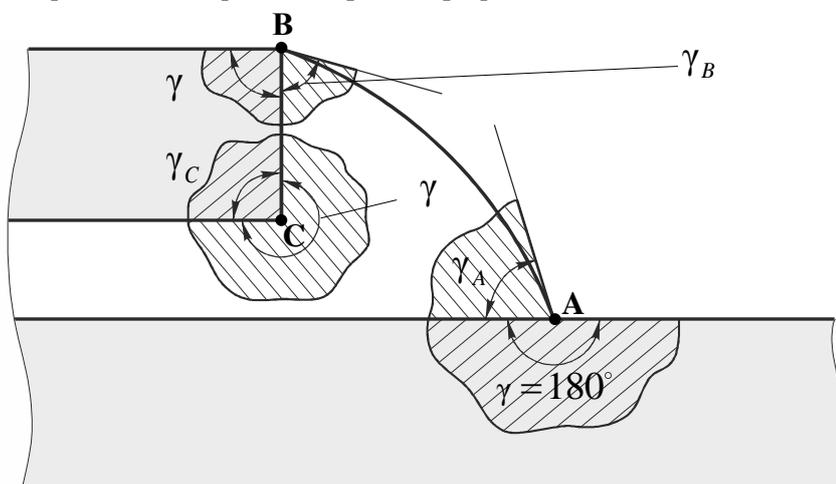


Рис. 6. Варианты составных клиньев с вершиной в особых точках

построения сингулярных решений для трехмерных и двумерных тел, численная реализация которого основана на методе конечных элементов.

Решения для составного клина, боковые грани которого свободны от напряжений (например рис. 6, особые точки **A** и **B**; γ_1, γ_2 , соответственно, равны γ, γ_A или γ, γ_B), позволяют оценить характер сингулярности напряжений в окрестности точки поверхности, где имеет место соединение двух разных материалов. Аналогично, решения для точки **C** (рис. 6) дают возможность определить характер сингулярности напряжений для внутренней особой точки, которая может иметь место в клеевых соединениях (например, при соединении с излишками клея).

Ранее в ряде работ [19–21] было показано, что в окрестности особых точек реальных конструкций оптимальные с точки зрения снижения уровня напряжений геометрии обладают общим свойством. Это свойство формулируется следующим образом: механические характеристики материалов и оптимальные углы, образующие касательные к поверхностям в особой точке в соответствующей задаче для клина, определяют границу между решениями с сингулярностью и без сингулярности.

Решение ряда оптимизационных задач позволило подтвердить данное свойство. Используя его, можно получить оптимальное решение, не ставя оптимизационную задачу. Для этого необходимо определить границу смены характера решения.

Подтверждение данного положения было получено и при оценке прочности клеевых соединений, работающих на отрыв (рис. 2, *а, в*) и сдвиг (рис. 2, *б*) в условиях идеального контакта, идеального скольжения или сухого трения на склеиваемых поверхностях. Так, например, при поиске оптимальной геометрии образца для испытаний на отрыв соединения металл – резина (рис. 2, *в*) вид кривой для соответствующего составного клина (особая точка типа **B**), которая разделяет решение с сингулярностью и без сингулярности, для конкретных механических характеристик материалов представлен на рис. 7.

Величины углов γ и γ_B у найденной оптимальной поверхности соответствуют одной из точек на кривой $\text{Re } \lambda_k = 1$ (рис. 7). Картины распределения напряжений для геометрий, соответствующих различным точкам на кривой $\text{Re } \lambda_k = 1$, отличаются незначительно. Имеющая место неединственность устраняется при обеспечении достаточной точности расчета напряженного состояния в процессе оптимизационного поиска. При этом оптимальный вариант будет соответствовать точке на кривой $\text{Re } \lambda_k = 1$ с наибольшим углом (в данном случае γ) у более жесткого материала. Этот вывод полностью совпадает с результатами, полученными при поиске оптимальной геометрии в окрестности особой точки клеевого соединения – рис. 2, *в*. Расположенные на оптимальной кривой (рис. 7) точки $\varphi_1(\gamma_B) = 52^\circ, \varphi_2(\gamma) = 7^\circ, \varphi_1(\gamma_B) = 51^\circ, \varphi_2(\gamma) = 90^\circ$ различаются по величине напряжений в пределах одного процента.

Таким образом, полученные результаты показывают, что для выбранного класса поверхностей для обеспечения оптимального по напряжениям клеевого соединения необходимо, чтобы в окрестности особых точек был создан тот вариант искомой геометрии, который определяет границу между решениями с сингулярностью и без сингулярности в соответствующей задаче для составного клина. Достаточно близкими к оптимальному варианту являются геометрии, в которых отсутствуют сингулярные решения. Используя это свойство, можно получить оптимальное решение, не ставя оптимизационную задачу.

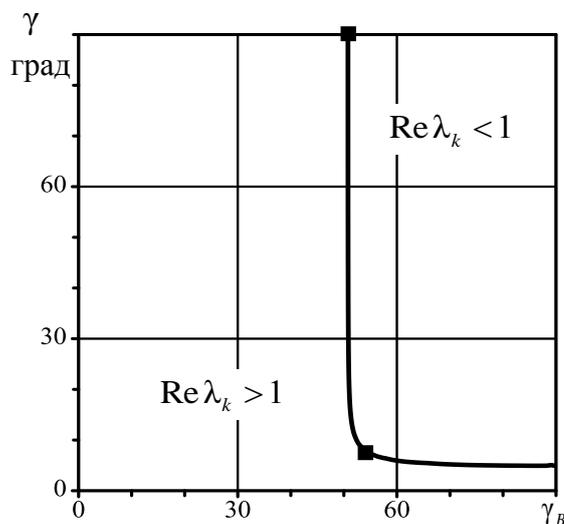


Рис. 7. Кривая $\text{Re } \lambda_k = 1$, разделяющая решение с сингулярностью и без сингулярности в плоскости параметров γ и γ_B

Библиографический список

1. He X. A review of finite element analysis of adhesively bonded joints // Int. J. Adhes. Adhes. – 2011. – Vol. 31. – № 4. – P. 248–264.
2. Speth D.R., Yang Y., Ritter G.W. Qualification of adhesives for marine composite-to-steel applications // Int. J. Adhes. Adhes. – 2010. – Vol. 30. – № 2. – P. 55–62.
3. Adams R.D., Comyn J., Wake W.C. Structural adhesive joints in engineering – London: Chapman and Hall, 1998. – 376 p.
4. Kinloch A.J. Adhesion and adhesives: science and technology. – London: Chapman and Hall, 1987. – 441 p.
5. Mays G.C., Hutchinson A.R. Adhesives in civil engineering. – Cambridge University Press, 1992. – 348 p.
6. ГОСТ 14760-69. Клеи. Метод определения прочности при отрыве. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 6 с.
7. ГОСТ 14759-69. Клеи. Метод определения прочности при сдвиге. – М.: ИПК изд-во стандартов, 1998. – 13 с.
8. ГОСТ 209-75. Клей и резина. Методы определения прочности связи с металлом при отрыве. М.: Изд-во стандартов, 1993.
9. Silva L.F.M. da, Neves P.J.C. das, Adams R.D. et al. Analytical models of adhesively bonded joints. Part I: Literature survey // Int. J. Adhes. Adhes. – 2009. – Vol. 29. – P. 319–330.
10. Adams R.D., Peppiatt N.A. Stress analysis of adhesive-bonded lap joints // J. Strain. Anal. – 1974. – Vol. 9. – № 3. – P. 185–196.
11. Crocombe A.D. Global yielding as a failure criterion for bonded joints // Int. J. Adhes. Adhes. – 1989. – Vol. 9. – P. 145–153.
12. Silva L.F.M. da, Rodrigues T., Figueiredo M.A.V. et al. Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength // J. Adhes. – 2006. – Vol. 82. – № 11. – P. 1091–1115.
13. Минакова С.Г. Анализ сингулярности напряжений в точке поверхности, где имеет место контакт разнородных упругих материалов, при некоторых углах раствора клиньев, образующих зону контакта // Напряжения и деформации в конструкциях и материалах. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. – С. 69–72.
14. Матвеев В.П., Федоров А.Ю. Оптимизация геометрии составных упругих тел как основа совершенствования методик испытаний на прочность клеевых соединений // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2011. – Т. 4. – № 4. – С. 63–70.
15. Матвеев В.П., Накарякова Т.О., Севодина Н.В., Шардаков И.Н. Исследование сингулярности напряжений в вершине конуса с эллиптическим основанием // ДАН. – 2006. – Т. 411. – № 3. – С. 326–329.
16. Matveyenko V.P., Nakaryakova T.O., Sevodina N.V., Shardakov I.N. Stress singularity at the vertex of homogeneous and composite cones for different boundary conditions // J. of Appl. Math. And Mech. – Vol.72. – 2008. – P. 331–337.
17. Борзенков С.М., Матвеев В.П. Оптимизация упругих тел в окрестности особых точек // Изв. РАН МТТ. – № 2. – 1996. – С. 93–100.
18. Korepanova T.O., Matveenko V.P., Sevodina N.V. Numerical analysis of stress singularity at singular points of three-dimensional elastic bodies // Acta Mech. – 2013. – Vol. 224. – P. 2045–2063.
19. Matveyenko V.P., Borzenkov S.M. Semianalytical singular element and its application to stress calculation and optimization // Int. Journal For Numerical Methods In Engineering. – 1996. – Vol. 39. – P. 1659–1680.
20. Matveenko V.P., Sevodina N. V., Fedorov A.Yu. Optimization of geometry of elastic bodies in the vicinity of singular points on the example of an adhesive lap joint // J. Appl. Mech. Tech. Phys. – 2013. – Vol. 54. – № 5. – P. 841–846.
21. Fedorov A.Yu., Matveenko V.P. Application of singular solutions for optimization of geometry of specimens used for testing the strength of adhesive joints // Topical Problems in Theoretical and Applied Mechanics / ed. N.K. Gupta, A.V. Manzhurov, R. Velmurugan. – New Delhi: Elite Publishing House PVT LTD, 2013 – P. 156–167.