

УДК 624.078.43

Я.С. Карпов, д-р техн. наук,  
П.М. Гагауз, канд. техн. наук,  
Ф.М. Гагауз, канд. техн. наук

## **ОБЩАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АДГЕЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЛИНЕЙНОЙ ОДНОМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ**

Адекватность описания какой-либо методикой реальной конструкции и достоверность результатов расчета напряжений и деформаций необходимо оценить путем экспериментальных исследований, причем прямым сравнением прогнозируемых величин, а не косвенным путем моделирования через промежуточные или вспомогательные параметры. Наибольшую ценность имеют эксперименты по оценке принятых гипотез и допущений, благодаря которым любая методика становится возможной. В этом аспекте адгезионные соединения являются одними из самых трудно исследуемых экспериментально технических объектов и, вероятно, этим объясняется большое количество научных публикаций на тему соединений. Больше, наверное, написано только по пластинам и оболочкам.

Экспериментально прямым образом измеряется сила разрушения соединения и деформации по наружным поверхностям деталей. Разрушение материала клеевого слоя происходит в условиях сложного напряженно-деформированного состояния – элементарный объем клея нагружен всеми шестью компонентами напряжений, и при отсутствии убедительных доказательств о возможности применения той или иной теории (критерия) прочности невозможно сделать выводы о достоверности и адекватности методик расчета. Этим объясняется стандартизированные методы и способы экспериментального обеспечения расчета на прочность клеевых соединений, а также методы и средства определения межслойной прочности композитных материалов, монолитность которых обеспечивается адгезионным соединением слоев между собой, а также волокон и матрицы. Очевидно, что каким бы не было искусство экспериментатора, сложно себе представить прямое измерение чего-либо в зоне контакта волокна диаметром 5...10 мкм со связующим. Это же относится и к склейке слоев, потому что введение датчиков в клеевую прослойку приводит к фундаментальному нарушению естественного напряженно-деформированного состояния (НДС). Зная, что распределение касательных напряжений по длине соединения является неравномерным, разработчики стандартов и других нормативных документов установили метод и способ определения условной (договорной) прочности клеевых соединений и межслойной прочности слоистых композитов [1].

В реальных конструкциях адгезионным способом могут соединяться детали постоянной или переменной (малой и большой) толщины,

воспринимающие сжимающие или растягивающие усилия в комбинации со сдвигом или без него. Кроме того, всегда есть потребность прогнозирования несущей способности соединения при наличии дефектов типа непрочности, чтобы более конкретно регламентировать технологические процессы, а значит, и себестоимость продукции. В многочисленной научно-технической литературе приведены методики определения НДС адгезионных соединений, построенные на базе различных гипотез и учитывающие те или иные конструктивные и экспериментальные факторы [2 – 15]. Несмотря на несомненную ценность, эти результаты трудно сравнивать с экспериментальными, полученными путем испытания стандартизованных образцов [1]. Таким образом, разработка общей методики расчета адгезионных соединений для любого характера термомеханического нагружения при постоянных или ступенчато изменяющихся жесткостных параметрах соединяемых деталей и клеевой прослойки является актуальной задачей. Система гипотез и допущений при этом должна оставаться инвариантной, что позволит корректно сравнивать аналитические и экспериментальные данные, а также более объективно оценивать важность учета дополнительных параметров и условий.

Основные гипотезы и допущения расчетных схем адгезионных соединений относятся к характеру прогнозируемого распределения нормальных напряжений по толщине деталей (постоянные или переменные) и касательных напряжений (только в клеевом слое или в деталях), а также учета влияния ширины соединения). Подробный анализ разработанных моделей напряженного состояния соединений содержится в статьях и монографиях [2 – 8]. Вопросы учета таких факторов, как переменная жесткость деталей, температурное нагружение, особенности структуры композита, и некоторых других наиболее полно рассматриваются в работах [4, 5, 9 – 15].

Сопоставление нормативной базы экспериментального обеспечения расчета на прочность клеевых соединений (методики и образцы для определения прочности клея) и разработанных методик определения напряжений показывает, что целесообразно формировать аналитическую часть расчета на базе одномерной модели (постоянство нормальных напряжений по толщине соединяемых деталей). В пользу такого подхода свидетельствует и то, что максимальные значения касательных напряжений в клеевой прослойке, найденные по одно- и двумерной моделям, отличаются незначительно, хотя и расположены в разных местах по длине соединения [5, 16]. Следует также отметить, что классическая модель соединительного слоя (касательные напряжения сосредоточены только в клеевом слое) приводит к пессимистической оценке несущей способности, а модель Фолькерсена (касательные напряжения постоянны по толщине соединительного слоя, образуемого клеем и половинами толщины деталей [2, 5]) – к оптимистическому прогнозу. В тех случаях, когда качество склеивания гарантируется технологией, например при

приформовке в интегральных конструкциях из композитов, целесообразно применять модель Фолькерсена, а при не очень надежном процессе склеивания – классическую модель.

В монографии [5] предложен метод физической дискретизации для определения усилий в элементах соединения, который сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений. Синтезированная методика является достаточно универсальной как относительно вида нагружения, так и характера изменения жесткости деталей по длине соединения. Некоторые сложности возникают при решении задач проектирования соединения, когда ограничения на параметры удобно иметь в виде функциональной зависимости, а не системы уравнений, тем более, что разработчику необходимы формулы для определения только максимальных напряжений в клее и для оценки предельных состояний (стремление к нулю напряжений в средней зоне соединений, стабилизация величины максимальных напряжений с увеличением длины и др.). Для расчета адгезионных соединений с нагружением в пределах соединения в учебнике [17] предложена процедура декомпозиции, которая может служить основой для построения общей методики определения НДС для широкого класса конструктивно-технологических решений. Суть разработки заключается в следующем. Ступенчатое клеевое соединение (рис. 1, а) или соединение деталей со ступенчатым изменением толщины (рис. 1, б), что наиболее присуще слоистым композитам, разбивается на ряд участков с постоянными параметрами (рис. 1, в), для которых существуют аналитические решения. Неизвестные усилия в местах разреза определяются из уравнений равновесия и совместности деформаций соединительного слоя. При наличии непрочекля поступают аналогичным образом (см. рис. 2). Очевидно, что в этом случае возможно также изменение толщины деталей.

Рассмотрим вывод расчетных формул и зависимостей для случая, изображенного на рис. 1. Согласно [17] после некоторых преобразований касательные напряжения в соединительном слое (как в классическом понимании, так и в смысле Фолькерсена) определяются по следующим формулам соответственно для 1-го,  $i$ -го и  $n$ -го участков соединения единичной ширины:

$$\tau_1(x) = \frac{(N_{21}\Pi_{21} - N_{11}\Pi_{11})chk_1x}{k_1\Pi_{31}shk_1l_1} - \frac{(N_{20}\Pi_{21} - N_{10}\Pi_{11})chk_1(l_1 - x)}{k_1\Pi_{31}shk_1l_1} + \frac{\Delta T(\alpha_{11} - \alpha_{21})}{k_1\Pi_{31}} \frac{shk_1\left(\frac{l_1}{2} - x\right)}{ch\frac{k_1l_1}{2}}, \quad (1)$$

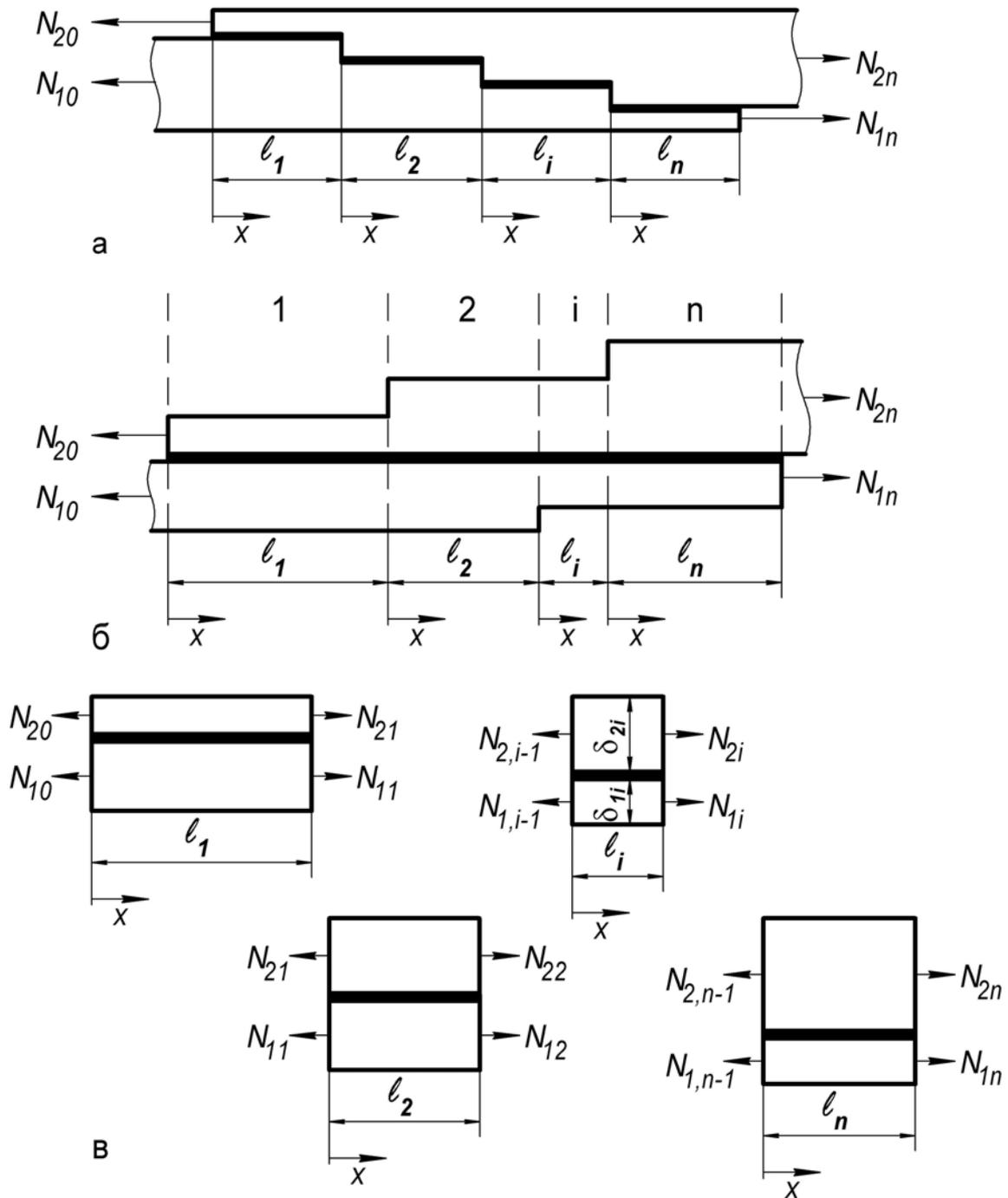


Рисунок 1 – Схема формирования расчетной схемы соединения деталей со ступенчато изменяющейся толщиной

$$\tau_i(x) = \frac{(N_{2i}\Pi_{2i} - N_{1i}\Pi_{1i})chk_i x}{k_i\Pi_{3i}shk_i l_i} - \frac{(N_{2,i-1}\Pi_{2,i-1} - N_{1,i-1}\Pi_{1,i-1})chk_i (l_i - x)}{k_i\Pi_{3i}shk_i l_i} + \frac{\Delta T (\alpha_{1i} - \alpha_{2i})}{k_i\Pi_{3i}} \frac{shk_i \left( \frac{l_i}{2} - x \right)}{ch \frac{k_i l_i}{2}}; \quad (2)$$

$$\tau_n(x) = \frac{(N_{2n}\Pi_{2n} - N_{1n}\Pi_{1n})chk_n x}{k_n\Pi_{3n}shk_n\ell_n} - \frac{(N_{2,n-1}\Pi_{2,n-1} - N_{1,n-1}\Pi_{1,n-1})chk_n(\ell_n - x)}{k_n\Pi_{3n}shk_n\ell_n} + \frac{\Delta T(\alpha_{1n} - \alpha_{2n})}{k_n\Pi_{3n}} \frac{shk_n\left(\frac{\ell_n}{2} - x\right)}{ch\frac{k_n\ell_n}{2}}. \quad (3)$$

Здесь обозначено:

$N_{10}, N_{20}, N_{1n}, N_{2n}$  – внешние погонные усилия, которые удовлетворяют уравнению равновесия соединения

$$N_{10} + N_{20} = N_{1n} + N_{2n}; \quad (4)$$

$\alpha_{1i}, \alpha_{2i}$  – коэффициенты линейного температурного расширения материалов соединяемых деталей;

$\Delta T$  – рассматриваемый интервал эксплуатационных температур;

$\Pi_{1i}, \Pi_{2i}$  – податливости деталей единичной ширины:

$$\Pi_{1i} = \frac{1}{E_{1i}\delta_{1i}}; \quad \Pi_{2i} = \frac{1}{E_{2i}\delta_{2i}}; \quad (5)$$

$\Pi_{3i}$  – податливость соединительного слоя, величина которой зависит от принимаемой модели [17].

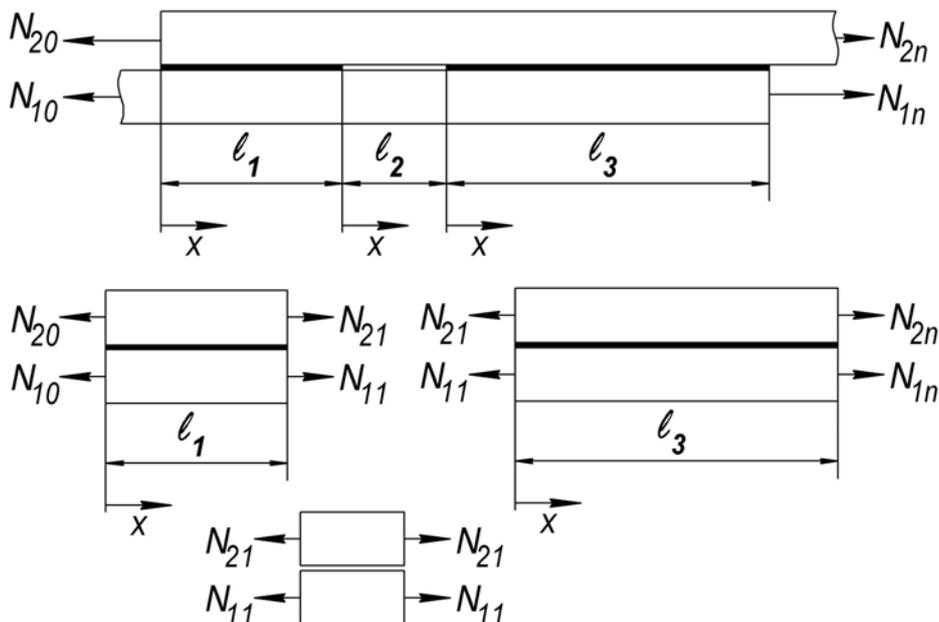


Рисунок 2 – Расчетная схема соединения с непроклеем

Для классической модели

$$\Pi_{3i} = \frac{\delta_{ki}}{G_{ki}}. \quad (6)$$





Таблица – Схемы соединений и параметры их нагружения

Назначение соединения	Схема нагружения	Параметры нагружения
Передача усилия		$N_{10} = N; N_{20} = 0;$ $N_{1n} = 0; N_{2n} = N.$
Включение		$N_{10} = N; N_{1n} = N;$ $N_{20} = 0; N_{2n} = 0.$
Возврат усилия		$N_{10} = N; N_{20} = -N;$ $N_{1n} = 0; N_{2n} = 0.$
Перераспределение усилия (суммирование)		$N_{10} = N; N_{1n} = N_1;$ $N_{20} = 0; N_{2n} = N - N_1.$
Температурное воздействие		$N_{10} = 0; N_{20} = 0;$ $N_{1n} = 0; N_{2n} = 0.$
Передача усилия		$N_{10} = 0; N_{20} = 0;$ $N_{1n} = 0; N_{2n} = N;$ $N_{1i}^* = N_{1i} + N.$
Передача усилия		$N_{10} = 0; N_{1n} = 0;$ $N_{20} = -N_1; N_{2n} = N - N_1;$ $N_{1i}^* = N_{1i} + N.$

Рассмотрим реализацию предложенного алгоритма на примере соединения одноступенчатых деталей (рис. 3, а). Для рассматриваемого соединения  $N_{10} = N_{2n} = N; N_{20} = N_{1n} = 0; N_{12} = N_{1n} = 0; \Delta T = 0$ . Неизвестное усилие  $N_{11}$  в сечении, характеризующемся изменением толщины деталей, определяется из первого уравнения системы (12):

$$N_{11} \left[ \frac{(\Pi_{11} + \Pi_{21})chk_1l_1}{k_1\delta_{c1}shk_1l_1} + \frac{(\Pi_{12} + \Pi_{22})chk_2l_2}{k_2\delta_{c2}shk_2l_2} \right] =$$

$$= N \left[ \frac{\Pi_{11} + \Pi_{21}}{k_1\delta_{c1}shk_1l_1} + \frac{\Pi_{21}(chk_1l_1 - 1)}{k_1\delta_{c1}shk_1l_1} + \frac{\Pi_{22}(chk_2l_2 - 1)}{k_2\delta_{c2}shk_2l_2} \right]. \quad (15)$$

Отсюда

$$N_{11} = N \frac{\frac{\Pi_{11} + \Pi_{21}chk_1l_1}{k_1\delta_{c1}shk_1l_1} + \frac{\Pi_{22}(chk_2l_2 - 1)}{k_2\delta_{c2}shk_2l_2}}{\frac{\Pi_{11} + \Pi_{21}}{k_1\delta_{c1}} cthk_1l_1 + \frac{\Pi_{12} + \Pi_{22}}{k_2\delta_{c2}} cthk_2l_2}. \quad (16)$$

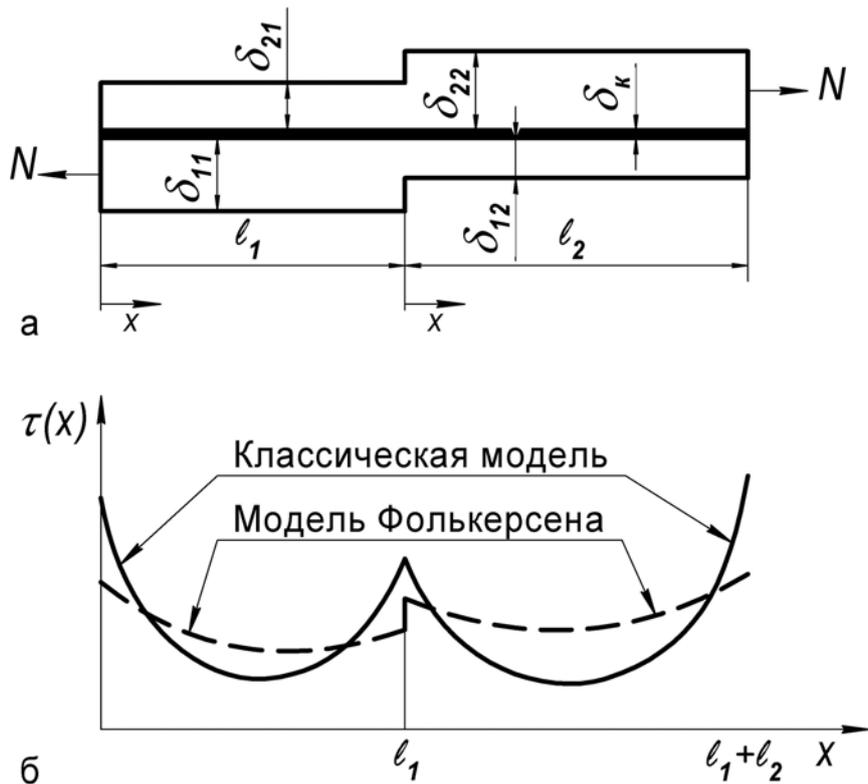


Рисунок 3 – Схема соединения одноступенчатых деталей

Из условия (9) определяется  $N_{21}$ :

$$N_{21} = N - N_{11} = N \frac{\frac{\Pi_{11}(chk_1 l_1 - 1) + \Pi_{12}chk_2 l_2 + \Pi_{22}}{k_1 \delta_{c1} shk_1 l_1} + \frac{\Pi_{12}chk_2 l_2 + \Pi_{22}}{k_2 \delta_{c2} shk_2 l_2}}{\frac{\Pi_{11} + \Pi_{21}}{k_1 \delta_{c1}} cthk_1 l_1 + \frac{\Pi_{12} + \Pi_{22}}{k_2 \delta_{c2}} cthk_2 l_2}. \quad (17)$$

Из общей формулы (14) или из выражений (1) и (3) следуют такие зависимости для определения напряжений в клеевом слое на участках 1 и 2:

$$\tau_1(x) = \frac{1}{k_1 \Pi_{31} shk_1 l_1} \left[ (N_{21} \Pi_{21} - N_{11} \Pi_{11}) chk_1 x + N \Pi_{11} chk_1 (l_1 - x) \right]; \quad (18)$$

$$\tau_2(x) = \frac{1}{k_2 \Pi_{32} shk_2 l_2} \left[ N \Pi_{22} chk_2 x + (N_{11} \Pi_{12} - N_{21} \Pi_{22}) chk_2 (l_2 - x) \right].$$

На рис. 3, б схематично показаны графики этих зависимостей. Скачок напряжений для модели Фолькерсена объясняется тем, что толщина соединительных слоев может быть различной по участкам соединения:

$$\delta_{c1} = \frac{\delta_{11}}{2} + \frac{\delta_{21}}{2} + \delta_k; \quad \delta_{c2} = \frac{\delta_{12}}{2} + \frac{\delta_{22}}{2} + \delta_k. \quad (19)$$

Главное условие – неразрывность деформаций, которое безусловно соблюдается для обеих моделей соединительного слоя.

Аналитические зависимости (18) позволяют обоснованно прогнозировать конструкцию с максимальной несущей способностью, характеризующейся тем, что

$$\tau_1(0) = \tau_1(l_1) = \tau_2(0) = \tau_2(l_2). \quad (20)$$

С учетом этих условий-равенств можно выбрать соответствующие толщину деталей и длину участков.

Рассмотрим реализацию предложенного способа декомпозиции конструкции на примере задачи о непрочлее (см. рис. 2). Первый и третий участки представляют собой классическое соединение деталей, и распределение касательных напряжений в клеевом слое описывается формулами [17] (см. также (1) и (3)):

$$\begin{aligned} \tau_1(x) = & \frac{N_{21}\Pi_{21} - N_{11}\Pi_{11}}{k_1\Pi_{31}\operatorname{sh}k_1l_1} \operatorname{ch}k_1x - \frac{N_{20}\Pi_{21} - N_{10}\Pi_{11}}{k_1\Pi_{31}\operatorname{sh}k_1l_1} \operatorname{ch}k_1(l_1 - x) + \\ & + \frac{\Delta T(\alpha_{11} - \alpha_{21})}{k_1\Pi_{31}} \frac{\operatorname{sh}k_1\left(\frac{l_1}{2} - x\right)}{\operatorname{ch}\frac{k_1l_1}{2}}; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \tau_3(x) = & \frac{N_{2n}\Pi_{23} - N_{1n}\Pi_{13}}{k_3\Pi_{33}\operatorname{sh}k_3l_3} \operatorname{ch}k_3x - \frac{N_{21}\Pi_{23} - N_{11}\Pi_{13}}{k_3\Pi_{33}\operatorname{sh}k_3l_3} \operatorname{ch}k_3(l_3 - x) + \\ & + \frac{\Delta T(\alpha_{13} - \alpha_{23})}{k_3\Pi_{33}} \frac{\operatorname{sh}k_3\left(\frac{l_3}{2} - x\right)}{\operatorname{ch}\frac{k_3l_3}{2}}, \end{aligned} \quad (22)$$

Рассмотрим деформированное состояние участка непрочлея (рис. 4), для которого уравнение совместности деформаций [5, 16, 17] записывается следующим образом:

$$AD' + D'D'' = BB' + B'C'. \quad (23)$$

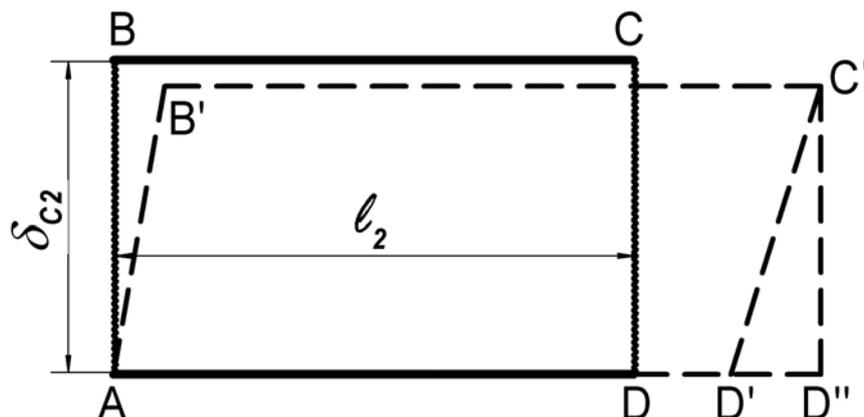


Рисунок 4 – Схема деформирования участка соединения с непрочлеем

Входящие в выражение (23) величины определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} AD' &= l_2(1 + N_{11}\Pi_{12} + \Delta T\alpha_{12}); & B'C' &= l_2(1 + N_{21}\Pi_{22} + \Delta T\alpha_{22}); \\ D'D'' &= \frac{\tau_3(0)}{G_{c3}}\delta_{c3} = \tau_3(0)\Pi_{33}; & BB' &= \tau_1(l_1)\frac{\delta_{c1}}{G_{c1}} = \tau_1(l_1)\Pi_{31}. \end{aligned} \quad (24)$$

Усилия в деталях  $N_{11}$  и  $N_{21}$  связаны уравнением равновесия

$$N_{10} + N_{20} = N_{11} + N_{21} = N_{1n} + N_{2n}, \quad (25)$$

отсюда 
$$N_{21} = N_{10} + N_{20} - N_{11} = N_{1n} + N_{2n} - N_{11}. \quad (26)$$

После подстановки (24) и (26) в условие (23) получим уравнение для определения неизвестного усилия  $N_{11}$  в месте разреза:

$$N_{11} = \frac{\Pi_{22}(N_{10} + N_{20}) - \Delta T(\alpha_{12} - \alpha_{22})}{\Pi_{12} + \Pi_{22}} + \frac{\tau_1(l_1)\Pi_{31} - \tau_3(0)\Pi_{33}}{l_2(\Pi_{12} + \Pi_{22})}. \quad (27)$$

Здесь  $\tau_1(l_1)$  и  $\tau_3(0)$  определяются формулами (21) и (22) в сечениях  $x = l_1$  и  $x = 0$  соответственно:

$$\begin{aligned} \tau_1(l_1) &= \frac{(N_{10} + N_{20} - N_{11})\Pi_{21} - N_{11}\Pi_{11}}{k_1\Pi_{31}\text{sh}k_1l_1} \text{ch}k_1l_1 - \frac{N_{20}\Pi_{21} - N_{10}\Pi_{11}}{k_1\Pi_{31}\text{sh}k_1l_1} - \\ &\quad - \frac{\Delta T(\alpha_{11} - \alpha_{21})}{k_1\Pi_{31}} \text{th} \frac{k_1l_1}{2}; \\ \tau_3(0) &= \frac{N_{2n}\Pi_{23} - N_{1n}\Pi_{13}}{k_3\Pi_{33}\text{sh}k_3l_3} - \frac{(N_{10} + N_{20} - N_{11})\Pi_{23} - N_{11}\Pi_{13}}{k_3\Pi_{33}\text{sh}k_3l_3} \text{ch}k_3l_3 + \\ &\quad + \frac{\Delta T(\alpha_{13} - \alpha_{23})}{k_3\Pi_{33}} \text{th} \frac{k_3l_3}{2}. \end{aligned} \quad (28)$$

После подстановки этих выражений в (27) и проведения необходимых преобразований получим следующее уравнение:

$$\begin{aligned} N_{11} &\left[ \frac{\Pi_{11} + \Pi_{21}}{k_1} \text{cth}k_1l_1 + l_2(\Pi_{12} + \Pi_{22}) + \frac{\Pi_{13} + \Pi_{23}}{k_3} \text{cth}k_3l_3 \right] = \\ &= (N_{10} + N_{20}) \left( \frac{\Pi_{21}}{k_1} \text{cth}k_1l_1 + l_2\Pi_{22} + \frac{\Pi_{23}}{k_3} \text{cth}k_3l_3 \right) + \frac{N_{10}\Pi_{11} - N_{20}\Pi_{21}}{k_1\text{sh}k_1l_1} + \\ &+ \frac{N_{1n}\Pi_{13} - N_{2n}\Pi_{23}}{k_3\text{sh}k_3l_3} - \Delta T \left[ \frac{\alpha_{11} - \alpha_{21}}{k_1} \text{th} \frac{k_1l_1}{2} + l_2(\alpha_{12} - \alpha_{22}) + \frac{\alpha_{13} - \alpha_{23}}{k_3} \text{th} \frac{k_3l_3}{2} \right]. \end{aligned} \quad (29)$$

При постоянных параметрах деталей и клея по длине соединения в этих формулах следует принять

$$\begin{aligned} \Pi_{11} = \Pi_{12} = \Pi_{13} = \Pi_1; \quad \Pi_{21} = \Pi_{22} = \Pi_{23} = \Pi_2; \\ \Pi_{31} = \Pi_{33} = \Pi_3; \quad k_1 = k_3 = k; \end{aligned} \quad (30)$$

$$\alpha_{11} = \alpha_{12} = \alpha_{13} = \alpha_1; \quad \alpha_{21} = \alpha_{22} = \alpha_{23} = \alpha_2.$$

Тогда уравнение (29) примет вид

$$\begin{aligned} N_{11}(\Pi_1 + \Pi_2)(cthkl_1 + l_2k + cthkl_3) = (N_{10} + N_{20})\Pi_2(cthkl_1 + kl_2 + cthkl_3) + \\ + \frac{N_{10}\Pi_1 - N_{20}\Pi_2}{shkl_1} + \frac{N_{1n}\Pi_1 - N_{2n}\Pi_2}{shkl_3} - \Delta T(\alpha_1 - \alpha_2) \left( th\frac{kl_1}{2} + kl_2 + tg\frac{kl_3}{2} \right). \end{aligned} \quad (31)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} N_{11} = (N_{10} + N_{20}) \frac{\Pi_2}{\Pi_1 + \Pi_2} + \frac{1}{(\Pi_1 + \Pi_2)(cthkl_1 + kl_2 + cthkl_3)} \left[ \frac{N_{10}\Pi_1 - N_{20}\Pi_2}{shkl_1} + \right. \\ \left. + \frac{N_{1n}\Pi_1 - N_{2n}\Pi_2}{shkl_3} - \Delta T(\alpha_1 - \alpha_2) \left( th\frac{kl_1}{2} + kl_2 + th\frac{kl_3}{2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (32)$$

Напряжения на краях непроклея определяют по формулам (28) после подстановки в них выражения (32) для  $N_{11}$ .

На основании предложенной методики и выведенных формул становится возможным прогнозирование последствий технологических рисков, например о степени изменения величины максимальных напряжений в клее, по которым ведется расчет на прочность, или о нормировании среднестатистических значений протяженности и местоположения непроклея.

## Выводы

На основании предложенного алгоритма декомпозиции соединения деталей со ступенчато изменяющейся толщиной и с учетом имеющегося аналитического решения для адгезионных соединений с постоянными параметрами по длине разработана теория определения НДС клееных конструкций при переменной толщине деталей, а также при наличии дефектов в виде непроклея. Получены необходимые расчетные формулы, которые могут использоваться в качестве ограничений в вариационных оптимизационных задачах проектирования соединений. Приведены примеры реализации синтезированной общей методики расчета напряжений в соединениях различного назначения при произвольном термо-механическом нагружении.

## Список использованных источников

1. Тарнопольский, Ю.М. Методы статических испытаний армированных пластиков [Текст] / Ю.М. Тарнопольский, Т.Я. Кинцис. – М.: Химия, 1981. – 272 с.
2. Артюхин, Ю.П. Напряжения в клеевых соединениях [Текст] / Ю.П. Артюхин // Исследования по теории пластин и оболочек: сб. науч. тр. – Казань: Изд-во КГУ, 1973. – Вып. 10. – С. 3 – 27.
3. Артюхин, Ю.П. Модифицированная теория Голанда – Рейснера склеенных пластин [Текст] / Ю.П. Артюхин // Исследования по теории пластин и оболочек: сб. науч. тр. – Казань: Изд-во КГУ, 1975. – Вып. 11. – С. 136 – 148.
4. Воробей, В.В. Соединения конструкций из композиционных материалов [Текст] / В.В. Воробей, О.С. Сироткин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 168 с.
5. Карпов, Я.С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов [Текст] / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 359 с.
6. Ржаницын, А.Р. Составные стержни и пластины [Текст] / А.Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1986. – 316 с.
7. Сироткин, О.С. Технология и механика соединений [Текст] / О.С. Сироткин, В.Б. Литвинов, В.И. Гришин. – М.: Арктика, 2000. – 314 с.
8. Фрейдин, А.С. Свойства и расчет адгезионных соединений [Текст] / А.С. Фрейдин, Р.А. Турусов. – М.: Химия, 1990. – 256 с.
9. Белоус, А.А. Расчет клеемеханического соединения внахлестку [Текст] / А.А. Белоус, А.М. Хватан // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. – М.: ЦАГИ, 1979. – Вып. 7. – С. 49 – 56.
10. Кутьинов, В.Ф. Расчет клеевых соединений [Текст] / В.Ф. Кутьинов // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. – М.: ЦАГИ, 1979. – Вып. 7. – С. 14 – 30.
11. Кутьинов, В.Ф. Расчет температурных напряжений в клееных составных балках [Текст] / В.Ф. Кутьинов // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. – М.: ЦАГИ, 1978. – Вып. 7. – С. 111 – 141.
12. Ионов, А.А. Расчет клеевых соединений в комбинированных конструкциях при обработке торца накладки на "ус" [Текст] / А.А. Ионов, В.Ф. Кутьинов // Проектирование, расчет и испытание конструкций из композиционных материалов. – М.: ЦАГИ, 1979. – Вып. 7. – С. 31 – 42.
13. Ионов, А.А. Расчет клеевых соединений в комбинированных конструкциях при обработке торца накладки на "ус" [Текст] / А.А. Ионов // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. – М.: ЦАГИ, 1978. – Вып. 9. – С. 98 – 111.

14. Ильина, А.Д. Высокопрочные соединения композиционных материалов [Текст] / А.Д. Ильина, Ю.С. Ильин // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. – М.: ЦАГИ, 1979. – Вып. 7. – С. 42 – 49.

15. Сироткин, О.С. Экспериментальное исследование упругих и прочностных характеристик соединений углепластиков в свободном и стесненном состоянии [Текст] / О.С. Сироткин, С.Ф. Растринин, В.А. Козлов // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. – М.: ЦАГИ, 1979. – Вып. 7. – С. 65 – 77.

16. Карпов, Я.С. Соединение высоконагруженных деталей из композиционных материалов. Сообщение 2. Моделирование напряженно-деформированного состояния [Текст] / Я.С. Карпов // Проблемы прочности. – 2006. – № 5. – С. 48 – 60.

17. Карпов, Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов [Текст]: учебник / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2010. – 768 с.

*Поступила в редакцию 07.04.2014.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Гайдачук,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*