

Первоначально оценивали влияние на прочность соединения касательных напряжений, возникающих в композиции из-за разницы коэффициентов линейного расширения. Для этого осуществляли десятикратный методический всесторонний нагрев образцов в печи с последующим охлаждением на воздухе ($20 \rightleftharpoons 900$ °С). Математическими расчетами определено и экспериментально доказано, что возникают небольшие по величине касательные напряжения. Прочность сварного соединения возросла от 1010 до 1170 МПа. Это, по-видимому, можно объяснить диффузионными процессами, интенсивность протекающих которых возрастает при циклическом нагреве и возникающих термических напряжениях – сжатия, нормальных к зоне соединения. Повышение прочности сварного соединения при циклическом температурном нагружении открывает возможности для разработки режимов тренировки слоистого материала с целью повышения его эксплуатационных характеристик.

Для испытания композиции в экстремальных условиях (высокоскоростной односторонний нагрев и охлаждение) разработана специальная автоматическая установка, состоящая из нагревателя – угольного сердечника, источника энергии – автотрансформатора высокой мощности, систем охлаждения – водяной и воздушной душ и системы автоматического режима работы. Образцы плотно собирали на угольном сердечнике, который разогревали электрическим током до температуры 2000 °С со скоростью 17 °С/с. В течение 1,5 мин температура внутренней поверхности образцов достигала 900 °С, а наружной – 450 °С. После охлаждения и повторных испытаний (10 циклов) в зоне соединения и на поверхности стали обнаружены термоусталостные микротрещины, снижающие прочность сварного соединения и работоспособность слоистого материала.

УДК 621.891

Т.В. КАЛИНОВСКАЯ, канд.техн.наук,
Д.И. ДМИТРОВИЧ (ФТИ АН БССР),
А.С. МАСАКОВСКАЯ, канд.техн.наук (БПИ)

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ СРЕЗЕ МОДЕЛИ ШЕРОХОВАТОСТИ КОНТАКТА

Анализ явлений, происходящих в области локальных контактов и приконтактном слое при трении, требует детального изучения закономерностей напряженно-деформированного состояния элементов шероховатости (гребешков) при приложении к ним сдвиговой и нормальной нагрузки.

Если предположить, что при сдвиге гребешка, выходящего за поверхность пластичного тела, линия сдвига, составляющая угол $\pi/4$ со свободной поверхностью гребешка, совпадает с направлением движения, то для рассмотрения его напряженного состояния можно воспользоваться закономерностями для нагруженного квадратного элемента с соответствующей его ориентацией относительно линии сдвига гребешка [1]. Возникающие при этом соотношения нормальных σ_n и касательных τ_k напряжений на подошве гребешка приводят к равенству напряжений $\sigma_n = \tau_k = k$, где k – константа сдвига.

С другой стороны, при исследовании несущей способности элементарных площадок контакта установлено, что нормальное давление в условиях предельного трения ($\tau_{\kappa} = k$) при поперечном смещении площадки контакта равно $\lim \sigma_n = k(1 + \pi/2)$ при $\tau_{\kappa} \rightarrow k$, отличаясь от предельного напряжения вдавливания без поперечного смещения $\sigma_n = k(2 + \pi)$ в два раза и от напряжения на подошве гребешка $\sigma_{\kappa} = k$ в $(1 + \pi/2)$ раз. Последнее различие в $(1 + \pi/2)$ раз вызывает противоречие между несущей способностью полупространства и регламентированным нами напряженным состоянием гребешка, которое должно перестраиваться таким образом, чтобы несущая способность гребешка соответствовала несущей способности пластического полупространства на углах гребешка $\alpha_0 \rightarrow \pi/2$ (рис. 1).

Рассмотрение условий равновесия в ряде простейших схем нагружения гребешков с целью выяснения связи осредненных значений нормальных и касательных напряжений на нагруженной грани и подошве гребешка с геометрическими параметрами последнего при приложении сдвигающей силы $T = kF$ (F — площадь подошвы гребешка) показало, что во всех случаях на опорной поверхности гребешка (подошве) при схеме сдвига не возникает нормальное напряжение ($\sigma_n = 0$). Отсутствие нормальной реакции не отвечает задаче трения, так как гребешок обладает несущей способностью и, следовательно, находится под нормальной нагрузкой. Приложение нормальной нагрузки N к опорной грани гребешка при сохранении его геометрии дает значение напряжений на ней $\sigma_n = k \operatorname{tg} \alpha_0$, $\tau_{\kappa} = k$. При $\alpha_0 \rightarrow \pi/2$ и $\tau_{\kappa} = k$ напряжения сжатия на грани гребешка и его подошве стремятся к бесконечности. В то же время известна предельная несущая способность пятна касания при сдвиге гребешка ($\alpha_0 \rightarrow \pi/2$), равная $\sigma_n = k(1 + \pi/2)$.

Проанализировав напряженное состояние гребешка при помощи полей линий скольжения, получим следующее значение напряжений на главной плоскости сдвига (подошве гребешка):

$$\sigma_n = k [1 + 2(\alpha_0 - \pi/4)], \quad \tau_{\kappa} = k.$$

В пределе, когда $\alpha_0 \rightarrow \frac{\pi}{2}$, нормальные напряжения на всей наклонной грани принимают значение $\sigma_n = (1 + \pi/2)k$. Таким образом, рассмотрение схемы сжатия — сдвига гребешка с привлечением поля линий скольжения позволило доказать, что напряженное состояние вырожденного гребешка при $\alpha_0 \rightarrow \pi/2$ (когда грань сливается с подошвой) совпадает с несущей способностью полосы контакта, нагруженной нормальной и предельной поперечной сдвигающей нагрузкой $\tau_{\kappa} \rightarrow k$. Пределы σ_n совпадают и равны $\sigma_n = (1 + \pi/2)k$. Эпюры сил трения и нормальных давлений на нагруженной грани пластического гребешка, построенные с привлечением теории линий скольжения и теории переходных областей, показаны на рис. 1.

Эпюра τ_{κ} представлена треугольником от B до C'' , где C'' является проекцией C на грань BA_1 (треугольная область ABC является областью равномерного сжатия), с направлением, отвечающим тенденции сдвига в сторону свободной поверхности. От C'' до C' напряжения трения возрастают по синусоиде,

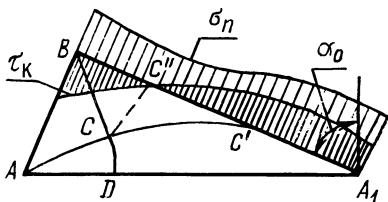


Рис. 1. Анализ сжатия – сдвига гребешка методом линий скольжения.

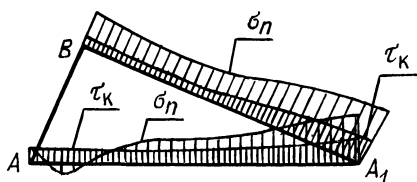


Рис. 2. Эпюры нормальных и касательных напряжений при сдвиге гребешка.

$0 \leq \tau_k \leq k$, на участке $C'A_1$ (CC' является границей сдвига) остаются постоянными. На этих участках τ_k направлено к A_1 . Отвечающая ей эпюра нормальных напряжений на грани очерчивается параболой на отрезке BC' с уменьшением напряжения $\sigma_n = (1 + \frac{\pi}{2})k$ до $\sigma_n = (\frac{5}{2} - \frac{\pi}{4})k$, переходной кривой на участке $C''C'$, где σ_n опять возвращается к величине $(1 + \pi/2)k$, и постоянным напряжением $\sigma_n = (1 + \pi/2)k$ на остальной части грани $C'A_1$.

Экспериментально были исследованы гребешки с углами при вершине 90° , деформируемыми сдвигающей силой T , распределенной по всей грани гребешка. Угол между подошвой и нагруженной гранью составлял 30° (рис. 2).

Как видно из рис. 2, силы трения на грани направлены в одну сторону и возрастают на грани в направлении точки A_1 , являясь отображением эпюры τ_{max} . Такое отличие в поведении силы трения на контакте от описанного в данной статье показывает, что теория переходных зон требует уточнения в области малых значений τ_{max} . Эпюра σ_n является сжимающей, имеет тенденцию к снижению в области $C''C'$, выделенной на рис. 1. Значения σ_n растут к точкам B и C' и на части грани $C'A_1$ почти постоянны, что вполне отвечает расчетной эпюре нормальных напряжений. На подошве гребешка эпюры нормальных и касательных напряжений имеют аналогичный характер: силы трения направлены в одну сторону, σ_n является сжимающим напряжением, за исключением небольшой области, прилегающей к свободной грани, и растет в сторону точки пересечения подошвы и нагруженной грани A_1 . Область растяжения вблизи свободной грани обусловлена возникновением трещины в области точки A при сдвиге.

В работе [1] было отмечено, что при сдвиге гребешка в направлении, совпадающем с его подошвой, поле линий скольжения очерчивает линзообразный очаг деформации, прилегающий к линии главного сдвига (подошве). Граница поля $ACC'A_1$ по форме близка к контуру линзы (рис. 1). Распределение сдвиговых деформаций в очаге, полученное экспериментально, показало, что нижняя граница очага деформации соответствует замкнутому линзообразному очагу деформации, а верхняя – незамкнутому линзообразному очагу деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макушок Е.М., Калиновская Т.В., Белый А.В. Массоперенос в процессах трения. – Минск: Наука и техника, 1978. – 272 с.