

УДК: 629.7.02

Влияние технологических несовершенств на работоспособность конструкции

А.И. Ендогур

Аннотация

Изложен вид закона, учитывающего влияния суммы несовершенств элементов конструкции или условий эксплуатации сложных изделий на сходимости теоретических и практических характеристик прочности или ресурса конструкции. Приведены примеры, показывающие возможность использования этого закона при испытаниях конструкций, а также при эксплуатации космической или автомобильной техники.

Ключевые слова

конструкция; работоспособность; технология; несовершенство; закон

При проектировании конструкций конструктор должен учитывать нормируемые отклонения в прочности материала и технологии изготовления, которые обозначены в сертификатах или указаны в технических требованиях чертежей.

Однако эксплуатация конструкции – это работа конструкции при суммарном множестве случайных, а иногда, и неслучайных событий, которые, сами по себе, по отдельности, не влияют на работоспособность конструкции, но при возможном одновременном совпадении одних событий с другими (так называемый закон умножения вероятностей), конструкция может стать неработоспособной.

К неслучайным событиям относится, например, сумма регулярно возникающих при конкретном технологическом процессе неправильностей, *лежащих в пределах допусков* на отклонения физических свойств (прочность, плотность) или геометрии конструкции (колебания размеров деталей, симметричные и несимметричные погиби теоретически заложенных при расчетах прямолинейных осей). Эти явления можно частично учесть при расчетах, используя более совершенные методики, где нормируемые погиби или волнистость учитываются при расчете прочности конструкции.

К случайным событиям относятся возникающие при изготовлении дефекты и возможные несовершенства конструкции (например, волнистость стенок или ребер конструкций, выполненных из тонколистового материала) *не устанавливаемые нормируемыми допусками и не учитываемые в расчетах*. Они могут определяться культурой производства на данном предприятии или в конкретной стране – изготовителе изделия, а могут быть свойством данной конструкции и не зависеть от конкретного производства.

Все эти случайные и неслучайные события для определенных значений параметров конструкции (назовем их *аргументом X*), могут проявляться в пределах *приемлемых отклонений практических характеристик работоспособности конструкции от теоретических, получаемых при расчетах*. При переходе значений аргумента X в другую область параметров, отклонения практических значений от теоретических могут быть *недопустимыми*.

Существует закономерность, знание которой в некоторых случаях помогает избежать больших или малых неприятностей при использовании технических изделий на практике. Поясним это на конкретных примерах.

По результатам экспериментальных испытаний некоторого количества образцов конструкции можно построить статистическую зависимость сравнения результатов теоретических расчетов разрушающих напряжений $\sigma^{\text{теор}}$ с фактическими экспериментальными данными испытаний $\sigma^{\text{факт}}$, где $\eta^* = \sigma^{\text{факт}} / \sigma^{\text{теор}}$. При этом необходимо, чтобы испытания проводились по одной и той же методике на одинаковых по типу и конструкции образцах и в одинаковых условиях испытаний. Такое сравнение теоретической и фактической прочности, например, конструкции панелей различных типов и размеров при работе на продольное сжатие [1], выполненных из различных материалов, показано на рис. 1 в виде изменения η^* в зависимости от толщины обшивки панелей δ .

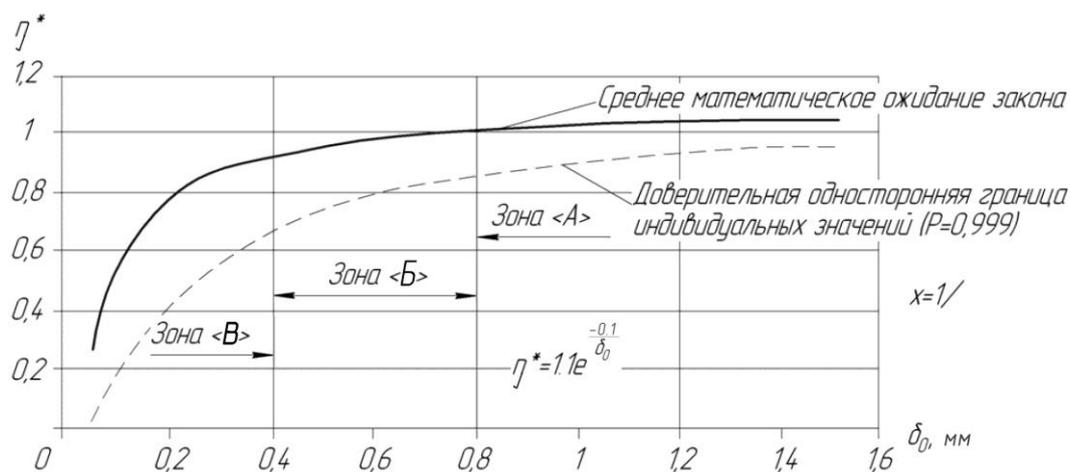


Рис. 1. Сравнение теоретических и фактических разрушающих напряжений

$$\text{панелей } \eta^* = \sigma^{\text{факт}} / \sigma^{\text{теор}}.$$

Из графика видно, что, начиная с некоторого значения толщины обшивки панелей δ_0 (меньше 0,7...0,8 мм), фактические значения прочности становятся значительно меньше теоретических значений. При этом отклонение практически не зависит от материала, из которого изготовлены экспериментальные панели, и от их размеров. А вот способ изготовления (клепаные, сварные, паяные) может сильно влиять на уровень прочности, снижая его на 20...25%.

При обработке результатов экспериментов с использованием методов теории вероятности и математической статистики для определения сходимости с теоретическими расчетами и оценки нижней границы доверительных интервалов, получено, что все эти результаты укладываются в регрессивную зависимость (закон), соответствующий уравнению

$$\log Y = A + BX$$

$$\eta^* = K_M e^{-K_H X},$$

где Y - функция, а X – аргумент.

При этом аргумент зависит от какого-либо основного параметра конструкции (характеристики аргумента), от которого прямо или косвенно зависят и другие параметры рационально спроектированной конструкции. Например, для рационально спроектированных стрингерных панелей от толщины несущей обшивки δ_0 зависит толщина стрингеров (или для сотовых панелей плотность сотового заполнителя) и высота панели.

Так, в приведенном на рис. 1 примере, аргументом, от которого зависит сходимость теории и эксперимента, является обратная величина толщины обшивки панелей, т. е. $X = 1/\delta_0$, где характеристикой аргумента будет δ_0 .

Коэффициент K_M не зависит от аргумента X . Он показывает только, насколько свойства конструкции (например, прочность материала или жесткость элементов конструкции) при всех значениях X могут влиять на среднюю теоретическую величину закона. В данном примере величина K_M для всех типов панелей (стрингерных, сотовых) равна 1,1, кроме сварных сотовых панелей.

Коэффициент K_H , наоборот, зависит от значений аргумента X , т. е. от регулярно появляющихся статистических неправильностей, суммарных несовершенств, возникающих при данном способе производства, культуре производства (соответствующим данному предприятию или стране), которых невозможно избежать или учесть при теоретических расчетах. Коэффициент K_H можно назвать «Коэффициентом технологических несовершенств»). Влияние K_H накладывается на влияние K_M .

Независимо от аргумента X для всех типов испытанных панелей, в данном примере значение K_H оказалось равным 0,1.

На графике и виде закона, приведенного на рисунке 1, условно показана зона, где сходимости теории и эксперимента при использовании принятой конкретной методики расчета удовлетворительна (зона «А»), а где начинается «обвал» значений прочности (зона «В»), полученной при теоретических расчетах. В зоне «В» пользоваться такой методикой нельзя.

В зоне «Б» следует задуматься о мерах по повышению точности методики расчета за счет возможного теоретического учета влияния на прочность конструкции неучтенных ранее несовершенств, постоянно имеющих место при изготовлении панельных конструкции, или просто перестраховаться, несколько увеличив запас прочности при расчетах.

На графике рис. 2 показан вид закона η^* при различных значениях коэффициентов K_M и K_H .

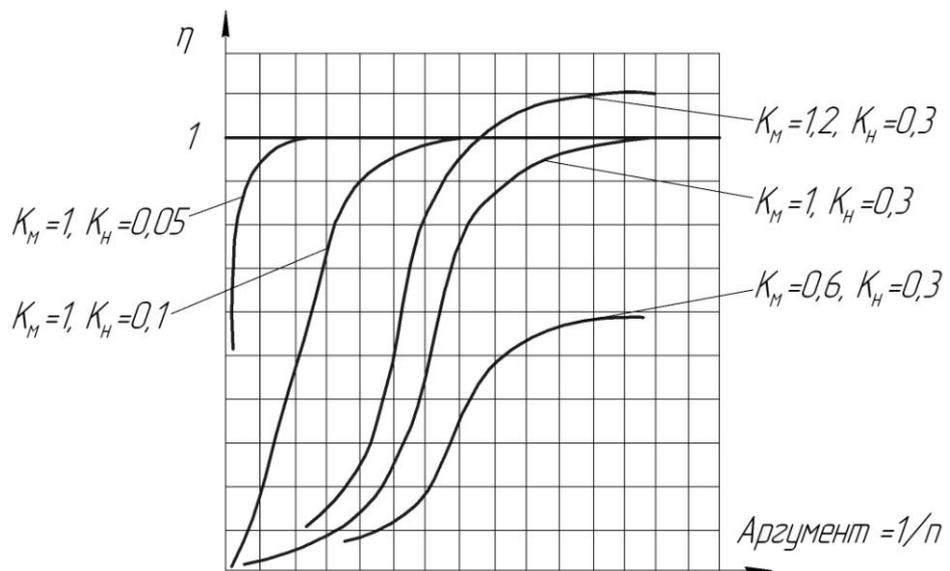


Рис. 2. Влияние коэффициентов K_M и K_H на графический вид закона η^*

Если значения аргумента дискретны, то закон принимает вид, показанный на рис.

3. В этом случае можно привести пример использования закона, связанный с эксплуатацией ВКС «Буран» или «Шаттл».

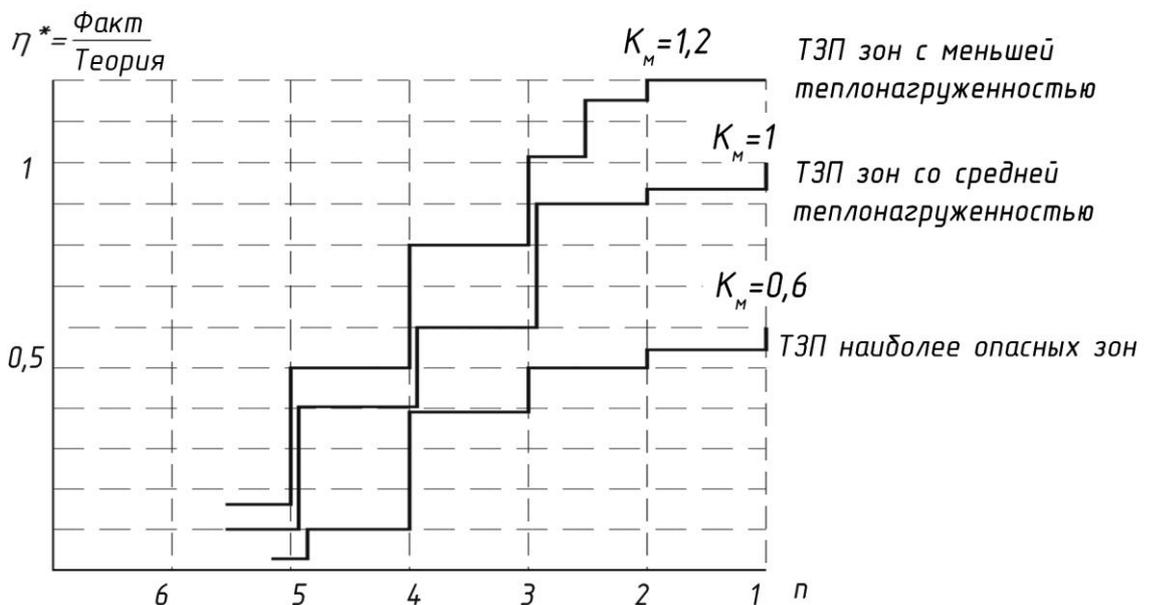


Рис. 3. Вид закона при дискретных значениях аргумента A

Если принять за n - количество дефектных плиток теплозащиты, поврежденных при изготовлении или во время нахождения на орбите, а за аргумент – отношение $X = 1/n$, тогда K_M может отражать влияние зон расположения поврежденных или выпавших плиток на значение вероятности безаварийной посадки. Зная по результатам наземного эксперимента (или теоретически) влияние разного количества дефектных плиток на работоспособность теплозащитного покрытия (ТЗП) в целом, т. е. K_H , можно определить

вид закона влияния этих погрешностей на вероятность безаварийной посадки в каждом конкретном случае.

Зная закон изменения η^* , можно заранее предсказать вероятность безаварийного приземления ВКС если, например, на орбите осмотреть поверхность ВКС (используя имеющиеся на борту средства – манипуляторы в грузовом отсеке или даже выход космонавтов в открытый космос) для оценки состояния ТЗП, особенно на наиболее теплонагруженных при спуске зонах поверхностей фюзеляжа и крыла.

Например, если предположить, что отсутствует одна плитка в наиболее опасной теплонагруженной зоне (стык углеродного носка крыла с ТЗП), то при $K_M = 0,6$, вероятность посадки будет 0,5, если выпали 2...3 плитки, то вероятность может упасть до 0,2...0,3, то есть, возможна катастрофа (кривая $K_M = 0,6$, $K_H = 0,3$ на рис. 3). В случае, если плитки ТЗП выпали в удаленной от носков зоне, то $K_M = 1$ и при двух-трех выпавших плитках вероятность посадки будет примерно 0,9. Для зон с малой теплонагруженностью ($K_M = 1,2$), выпадение двух или трех плиток не влияет на работоспособность изделия.

Конечно все зависит еще и от правильности определения величины коэффициентов K_H и K_M , и от того, выпали плитки в одном месте или в разных зонах.

В некоторых случаях в качестве аргумента может быть использовано влияние на вид закона η^* двух или нескольких параметров конструкции или условий эксплуатации. Например, для оценки вероятности получения заявленного ресурса автомобиля при условии езды по дорогам различной гладкости с той или иной скоростью. В этом случае за величину характеристики аргумента можно принять произведение величины шероховатости дороги в сантиметрах (дюймах или дециметрах) на скорость передвижения. До той поры, пока шероховатость дороги (или качество дорожного покрытия) будет, например, соответствовать европейскому стандарту, то заявленные величины ресурса могут соблюдаться для всего диапазона скоростей, определенного для данного автомобиля, то есть $\eta^* = 1$. Другая крайность, если рытвины и ухабы будут равны клиренсу автомобиля, тогда при движении с любой малой скоростью вероятность ресурса стремится к 0. Следует предположить, что при неважном качестве дороги и средней скорости движения наступит момент, когда ресурс, сначала изменяясь незначительно, затем начнет катастрофически падать, что соответствует типу кривой $K_M = 1$, $K_H = 0,3$ на рис. 3.

Аналогичным примером влияния суммы конструкторских и технологических несовершенств является несовпадение результатов теоретического расчета прочности конструкции планера самолета с прочностью, полученной при статическом испытании

первого изготовленного изделия. Как правило, результаты статических испытаний первой конструкции самолета не дают 100% прочности конструкции.

Выводы и рекомендации

1. При использовании теоретических расчетов для определения прочностных или ресурсных характеристик сложных составных конструкций целесообразно знание закона влияния конструкторско-технологических несовершенств η^* на сходимость теоретических и фактических значений работоспособности конструкции.

2. Достоверные значения коэффициентов закона η^* , определяющего сходимость результатов теоретических и фактических данных о прочности и ресурсе сложных конструкций, можно получить в результате обработки статистических данных эксплуатации изготовленных изделий и экспериментальных исследований прочности натуральных образцов конструкций.

Библиографический список

- 1.Ендогур А.И. Проектирование высокотемпературных авиационных конструкций с сотовым наполнителем. Диссертация на соискание ученой степени д-ра техн. наук. МАИ, 1984, 209 с.
- 2.Ендогур А.И. Проектирование авиационных конструкций. Проектирование конструкций деталей и узлов. Учебное пособие. – М.: Изд. МАИ-ПРИНТ, 2009. – 540 с.; ил.

Сведения об авторе

Ендогур Аскольд Иванович, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н., тел.: 8 916 492 1031, e-mail: nio1@mail.ru