

ЭНЕРГЕТИКА ПРОЦЕССА ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ОБРАЗОВАНИЯ ПОЛОСЫ ЛОКАЛИЗОВАННОГО СДВИГА

Основной вопрос энергетики технологического процесса – это вопрос баланса потребной и располагаемой энергии. Потребная энергия обусловлена возможностью пластического деформирования доли материала детали, которая по каким-либо причинам не соответствует необходимым параметрам формы и требует коррекции путем калибровки. Располагаемая энергия состоит в мощности источника энергии, затрачиваемой частично на устранение дефекта формы, а частично – на непроизводительные расходы в виде воздействия на технологическое оснащение и на не требующие коррекции участки детали.

Рассмотрим подробнее расчет потребной энергии. При заходе импульса давления от ударной волны на деталь (рис. 1) образуется полоса локализованного сдвига шириной b (см. рис. 1, б) и материал в этой зоне прилегает к оснастке (например, матрице).

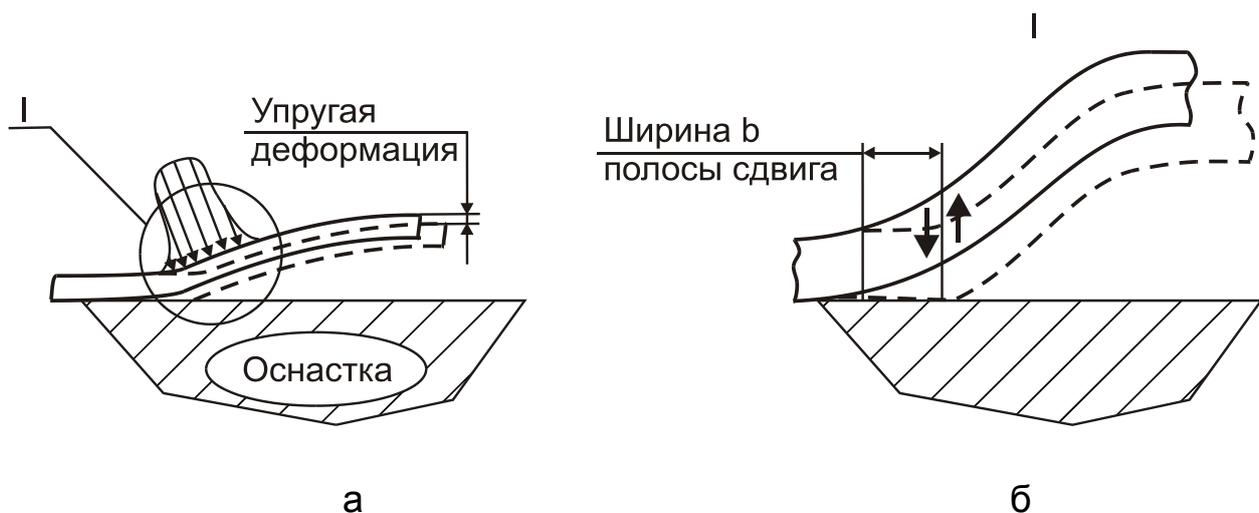


Рисунок 1 – Схема деформирования детали импульсным воздействием

Это приводит к некоторому уменьшению прогиба и размеров дефекта в результате упругого деформирования. Так происходит на каждом «шаге» движения ударной волны. Таким образом, можно констатировать, что энергия ударной волны затрачивается как на последовательные образования полос адиабатического сдвига, так и на упругое деформирование выпуклости в результате движения краев дефекта при образовании локализованной деформации сдвига (см. рис. 1, а).

Появление дефектов формы имеет стохастический характер, но для каждого технологического процесса и конкретной оснастки наблюдается некоторое постоянство появления дефектов. Принимая во внимание отсутствие возможности управления сферической ударной вол-

ной, представляется целесообразным принять, что все выпуклости имеют максимальные размеры. Только при таком подходе прогнозируемая величина потребной энергии будет гарантированно достаточной для устранения случайно расположенных и разноразмерных дефектов формы.

Таким образом, полная потребная энергия является суммой энергии упругого деформирования и энергии образования и развития полосы пластического сдвига:

$$U_{\text{полн}} = U_{\text{упр}} + U_{\text{пл}} \quad (1)$$

При известном количестве выпуклостей n , геометрия которых описывается зависимостями, приведенными в работе [1], для расчета $U_{\text{упр}}$ справедливы следующие формулы, полученные с использованием зависимостей, приведенных в работе [1]:

$$U_{\text{упр1}} = nu_1 = n \left[Dw_0^2 \frac{\pi^4}{32ab} \left(\frac{3}{\lambda^2} + 2\mu + 3\lambda^2 \right) + D_k w_0^2 \frac{\pi^4}{8ab} \right]; \quad (2)$$

$$U_{\text{упр2}} = nu_2 = n \left[\frac{2Dw_0^2}{ab} \left(\frac{4,46}{\lambda^2} + 2,88\mu + 4,46\lambda^2 \right) + D_k w_0^2 \frac{11,5}{ab} \right]. \quad (3)$$

Как уже указывалось ранее, максимальная деформация локализованного сдвига равна деформации начала деформационного упрочнения, т.е. соответствует точке В на рис. 2. После снятия внешней нагрузки (т.е. после прохода ударной волны) часть энергии, соответствующей площади ABC на рис. 2, рассеивается по детали и оснастке, а на собственно пластический сдвиг затрачивается энергия ОДАС (см. рис. 2). Тогда потребная энергия для пластического сдвига может быть рассчитана по формуле

$$U_{\text{пл}} = n \cdot ab\delta \cdot \bar{U}_{\text{пл}}, \quad (4)$$

где δ – толщина листа детали;

$\bar{U}_{\text{пл}}$ – площадь OAB на рис. 2 – полная энергия деформации, которая может быть определена по формуле

$$\bar{U}_{\text{пл}} = \tau_{\text{пл}} \cdot \gamma_{\text{пл max}} - \frac{1}{2} \frac{\tau_{\text{пл}}^2}{G} = \tau_{\text{пл}} \left(\gamma_{\text{пл max}} - \frac{1}{2} \frac{\tau_{\text{пл}}}{G} \right), \quad (5)$$

где $\gamma_{\text{пл max}}, \tau_{\text{пл}}$ – см. рис. 2.

Упругая доля деформации $\frac{\tau_{\text{пл}}^2}{G}$ во много раз меньше величины деформации $\gamma_{\text{пл max}}, \gamma_{\text{пл max}}$ что позволяет записать (5) в виде

$$\bar{U}_{пл} = \tau_{пл} \cdot \gamma_{пл\max}, \quad (6)$$

что соответствует пессимистической оценке величины потребной энергии.

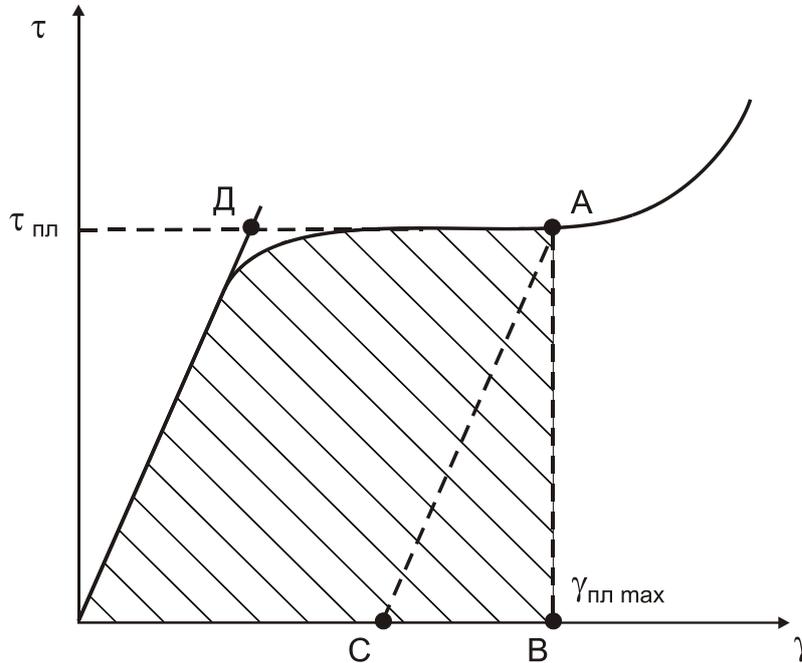


Рисунок 2 – К определению энергии пластического деформирования

После подстановки (6) в (4), а полученного результата совместно с (2) или (3) в выражение (1) получим искомые расчетные зависимости

$$U_{полн1} = n \left[Dw_0^2 \frac{\pi^4}{32ab} \left(\frac{3}{\lambda^2} + 2\mu + 3\lambda^2 \right) + D_k w_0^2 \frac{\pi^4}{8ab} + ab\delta\tau_{пл}\gamma_{пл\max} \right]; \quad (7)$$

$$U_{полн2} = n \left[\frac{2Dw_0^2}{ab} \left(\frac{4,46}{\lambda^2} + 2,88\mu + 4,46\lambda^2 \right) + D_k w_0^2 \frac{11,5}{ab} + ab\delta\tau_{пл}\gamma_{пл\max} \right]. \quad (8)$$

Рассматривая располагаемую энергию в виде точечного источника со сферическим характером воздействия, необходимо принимать во внимание, что давление зависит от угла встречи ударной волны с препятствием, в данном случае с поверхностью детали (рис. 3). Из условия постоянства результирующей силы следует соотношение

$$P \cdot AB = P_{фр} \Delta_{фр}, \quad (9)$$

где

$$AB = \sqrt{(R + \Delta_{фр})^2 - R^2 \cos^2 \alpha} - R \sin \alpha. \quad (10)$$

Отсюда

$$P = P_{\text{фр}} \frac{\Delta_{\text{фр}}}{\sqrt{(R + \Delta_{\text{фр}})^2 - R^2 \cos^2 \alpha - R \sin \alpha}} \quad (11)$$

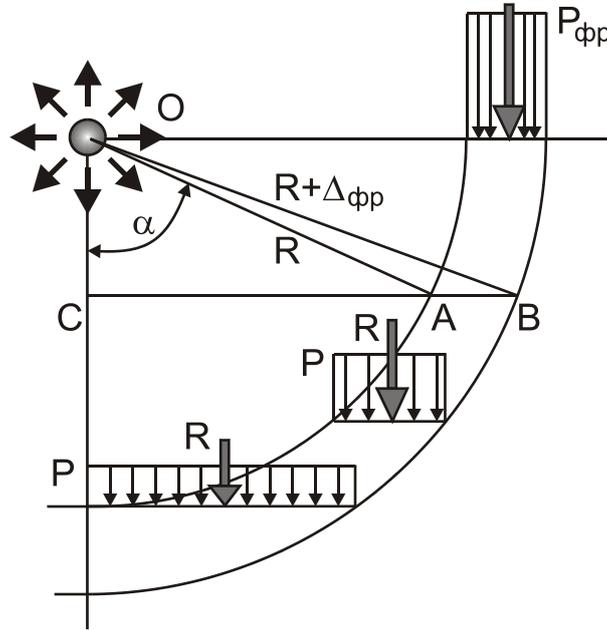


Рисунок 3 – Распределение давления в зависимости от угла падения ударной волны

После подстановки в (11) выражений, приведенных в работе [2], формула для расчета давления преобразуется к виду

$$P = P_0 \frac{2\chi(\chi^2 - 1)(M^2 - 1)}{\sqrt{4(2\chi + 1)^2 + (\chi + 1)^2 \cos^2 \alpha - \sin \alpha}} \quad (12)$$

Минимальное давление имеет место при $\alpha = 0$ и равно

$$P = P_0 \frac{2\chi(\chi^2 - 1)(M^2 - 1)}{\sqrt{4(2\chi + 1)^2 + (\chi + 1)^2}} \quad (13)$$

Это обстоятельство изменения величины давления в зависимости от угла встречи с ударной волной следует учитывать при расчете требуемого давления для реализации полосы пластического сдвига. Используя зависимости из работы [2], получаем

$$\tau_{max} = \frac{3 \bar{Q}}{2 \delta} = \frac{3 P \cdot \Delta}{2 \delta}, \quad (14)$$

где $\Delta = AB$ (см. рис. 3).

Как показано в работе [2], давление на фронте ударной волны убывает обратно пропорционально R^3 , и мощность источника энергии должна быть достаточной для того, чтобы в точках А и В (рис. 4) давление обеспечивало бы превышение τ_{max} предела текучести на сдвиг.

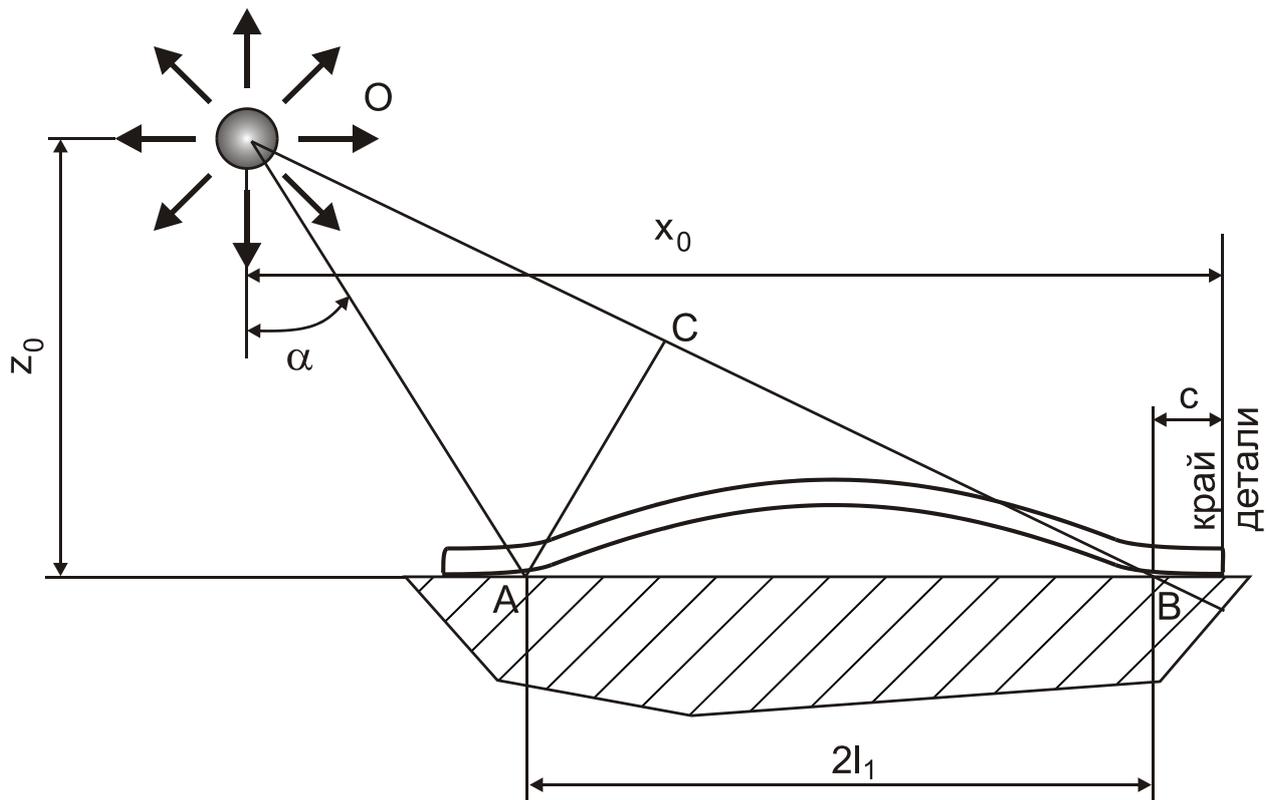


Рисунок 4 – К методике расчета энергии

В этих точках давление определяют по формуле (12), в которой значение угла α вычисляют так:

- точка А (см. рис. 4):

$$\operatorname{tg} \alpha_A = \frac{x_0 - c - 2l_1}{z_0} \quad \text{или} \quad \cos \alpha_A = \frac{z_0}{R_A}; \quad (15)$$

- точка В (см. рис. 4):

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{x_0 - c}{z_0} \quad \text{или} \quad \cos \alpha_B = \frac{z_0}{R_B}; \quad (16)$$

Выводы

Рассмотрены особенности энергетики процесса пластического деформирования с учетом образования полосы локализованного сдвига, а также синтезированы зависимости для определения потребной и располагаемой энергий, затрачиваемых при калибровке деталей.

Список использованных источников

1. Остапчук В.В. Математическое описание геометрии формы дефектов листовых деталей летательных аппаратов / В.В. Остапчук // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4(84). – Х.: НАКУ, 2015. – С. 69 – 78.

2. Остапчук В.В. Математическая модель деформирования при калибровке листовых деталей импульсным нагружением / В.В. Остапчук // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2(86). – Х.: НАКУ, 2016. – С. 48 – 55.

Поступила в редакцию 07.09.2016.

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