

УДК 621.7.014.4

Перлов В. Е.

РАСЧЕТ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОГИБЕ КРУГЛЫХ ТОНКОЛИСТОВЫХ ПЛАСТИН, ЗАЩЕМЛЕННЫХ ПО КОНТУРУ

В процессах листовой штамповки, а также при проведении автотехнических экспертиз часто возникает вопрос расчета энергосиловых параметров процесса прогиба круглых тонколистовых пластин, защемленных по контуру.

Решение указанной задачи в области упругих и небольших пластических деформаций, соизмеримых с толщиной пластин, приведено в [1]. Приближенное решение, в основу которого положено предположение о том, что напряжения распределены по толщине пластины равномерно, а форма изогнутой пластины близка к сферической поверхности, приводится в [2, 3].

В указанных работах решение дано для идеально пластических материалов и не учитывает их упрочнение, а также сложно применимо к решению конкретных производственных задач и экспертной практике, где необходимы простые оценочные зависимости. Анализ результата расчета усилия деформирования по методикам [2, 3] показывает существенное отклонение от экспериментальных результатов. Это связано со сложностью распространения теоретического решения задачи теории пластичности на различные толщины металла, а также с ограничением в указанном решении А. А. Ильюшина на величины прогиба. В нашем случае прогибы превышали толщину металла для тонких листов до 10 раз, и в этом случае наблюдается максимальное отклонение результатов расчета от экспериментальных данных.

В работе [4] проанализирован процесс деформирования квадратных тонколистовых пластин, защемленных по контуру, однако больший практический интерес представляют именно круглые пластины.

Целью работы является определение зависимостей для расчета усилий деформирования круглых тонколистовых пластин, защемленных по контуру, а также экспериментальное определение поправочных коэффициентов для расчета пластин разных толщин.

Для оценки точности результатов определения энергии различными методиками в условиях деформации листовых материалов проводили экспериментальные исследования. Исследования проводили на листовых образцах в виде круглых пластин из стали 08кп, диаметром $\varnothing 100$ мм разных толщин. Образцы изготавливались из одного листа толщиной 2,5 мм, после чего шлифовались до разных толщин: $t_0 = 1$ мм; 1,5 мм; 2 мм. Конструкция приспособления позволяет защемлять пластины по контуру, при этом можно измерять твердость в условиях консольного провисания пластин, либо при наличии жесткой опоры (рис. 1).

На пластинах измеряли твердость, при этом среднее 10 измерений принимали за исходное число твердости. Затем каждая пластина, защемленная по контуру, деформировалась жестким цилиндрическим пуансоном до различных степеней деформаций.

Схема нагружения листовых заготовок и общий вид приспособления показаны на (рис. 1, рис. 2).

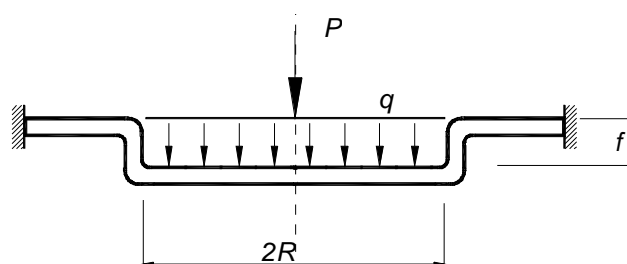


Рис. 1. Схема деформирования листовой заготовки цилиндрическим пуансоном



Рис. 2. Фото приспособления для проведения эксперимента

На каждой ступени деформирования фиксировалось усилие деформирования, при помощи индикатора часового типа проводилось измерение прогиба пластины, а также измерялась твердость в узлах предварительно нанесенной делительной сетки.

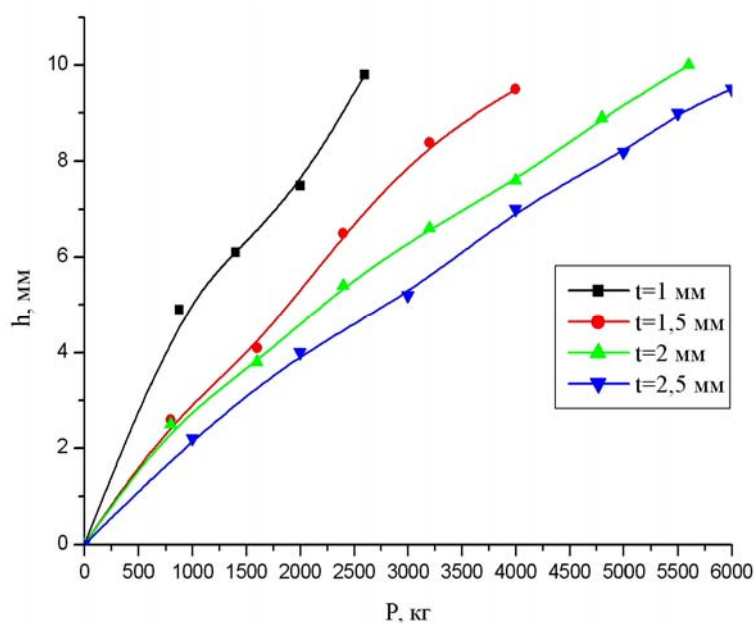
Максимальная величина прогиба пластин, колебалась от 9,5 до 10 мм.

Результаты измерений различных параметров пластин приведены в табл. 1 и (рис. 3).

Таблица 1

Результаты эксперимента при деформации круглых тонколистовых пластин

Толщина t , мм	$2R$, мм	Максимальный прогиб f , мм	Усилие деформирования P , Н эксперимент/ расчет	Твердость начальная H_{T0}	Твердость после деформации H_{Ti}	Расхождение между методами, %
1	100	9,8	2600/2689	505	652	3,42
1,5	100	9,5	4000/4121	454	589	3,03
2	100	10	5600/5893	390	509	5,23
2,5	100	9,5	6000/6313	395	517	5,22

Рис. 3. Зависимость глубины прогиба h от усилия деформирования P

После деформирования пластин и измерения всех геометрических параметров измеряли твердость твердомером ТЕМП-3 по стрелке B (рис. 4).

На рис. 5 представлены результаты измерения твердости в радиальных направлениях листовой заготовки толщиной 2 мм. Всего было сделано 10 измерений твердости. Среднее этих измерений для листовой заготовки толщиной $t_0 = 2$ мм на стороне, показанной стрелкой B , $H_T = 390$. Несмотря на различие схем измерения (консоль и жесткая опора) отличие результатов измерения твердости лежит в пределах 7 %.

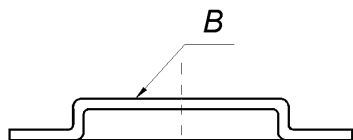


Рис. 4. Схема измерения твердости

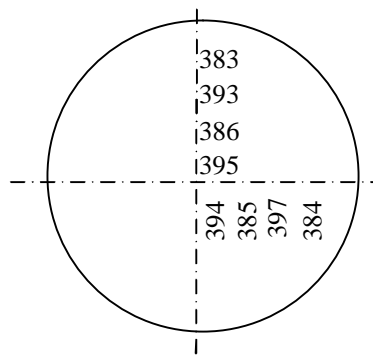


Рис. 5. Результаты измерения твердости по стрелке B листовой заготовки ($t_0 = 2$ мм)

Аналогично измеряли твердость во всех остальных листовых заготовках, геометрические параметры которых приведены в табл. 1.

Для определения энергии пластического деформирования листовых заготовок по распределению твердости необходимо располагать тарировочным графиком «коэффициент твердости k_H – интенсивность напряжений S_u – интенсивность деформаций e_u ».

Тарировочные графики $k_H = f(e_u)$ и $k_H = f(S_u)$ построенные по методике, изложенной в [4] для материала пластин – стали 08кп, приведены на рис. 6, рис. 7.

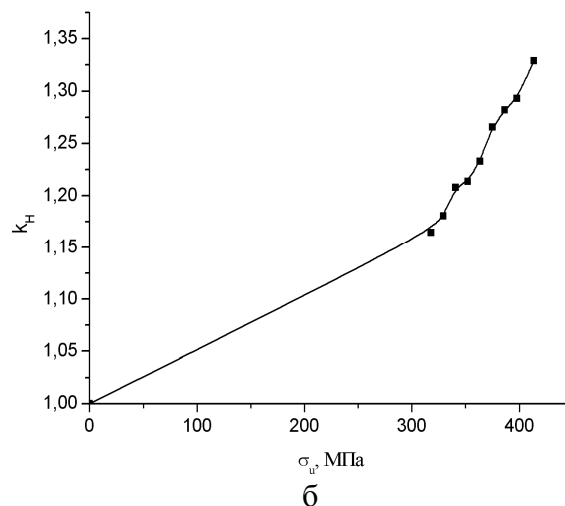
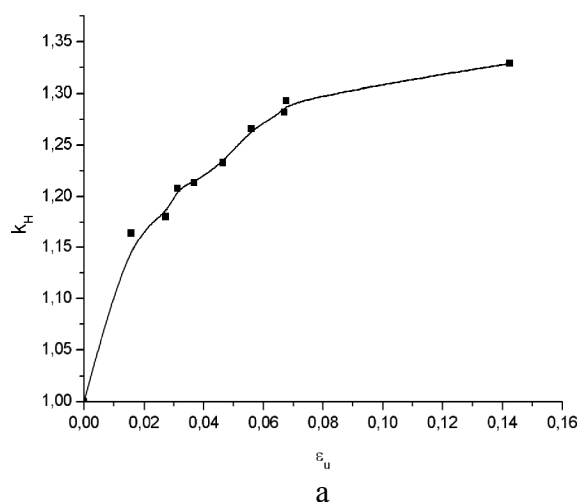


Рис. 6. Зависимость коэффициента твердости k_H от интенсивности деформаций e_u (а) и интенсивности напряжений S_u (б)

Для оценки величины предельных нагрузок, а также распределенной нагрузки, приходящейся на единицу площади, предлагается использовать формулы [4]:

$$P_{np} = \frac{b S_{ut}^2 p}{4}; \quad (1)$$

$$q_{np} = \frac{\beta \sigma_u t^2}{4R^2}, \quad (2)$$

где R – радиус деформируемой заготовки (рис. 1); σ_u – интенсивность напряжений, которая является функцией интенсивности деформаций e_u .

В указанных формулах, в отличие от [4], интенсивность напряжений σ_u – функция от интенсивности деформаций e_u , $\sigma_u = f(e_u)$, а β – коэффициент, зависящий от толщины металла, и определяется в настоящей работе экспериментально.

На рис. 8 показана зависимость коэффициента β от толщины листового металла t_0 .

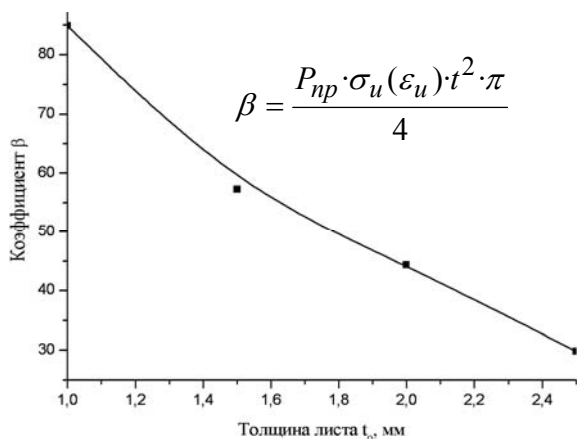


Рис. 7. Графическое определение коэффициента β в формулах (1), (2)

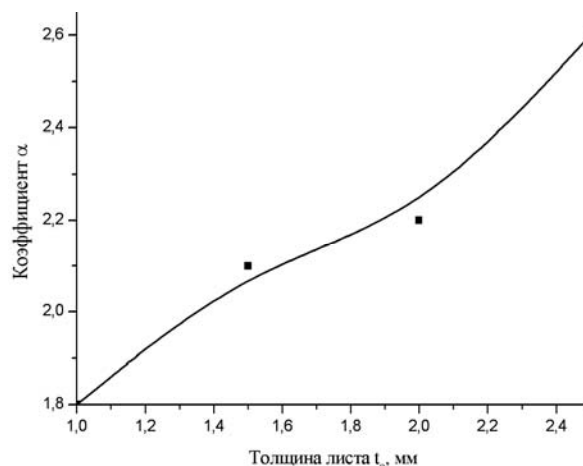


Рис. 8. Графическое определение коэффициента α в формуле (3) для различных толщин листового материала $1 \leq t_0 \leq 2,5$ мм

Величину интенсивности деформаций можно определить по тарировочному графику, а также по формуле:

$$e_u = \alpha \frac{f^2}{R^2}, \quad (3)$$

где α – поправочный коэффициент, зависящий от толщины металла (рис. 8). Удельная энергия пластической деформации определялась по формуле [4]:

$$W_{y\partial} = \int_0^e \sigma_u d\varepsilon_u, \quad (4)$$

где σ_u – интенсивность напряжений, МПа; ε_u – интенсивность деформаций.

Кривую $\sigma_u = f(\varepsilon_u)$ в теории пластичности называют единой кривой течения, которая не зависит от вида напряженного состояния, она аппроксимируется уравнением:

$$\sigma_u = A \varepsilon_u^n, \quad (5)$$

Тогда, подставив (5) в (4), получим:

$$W_{y\partial} = A \int_0^e \varepsilon_u^n d\varepsilon_u = A \frac{\varepsilon_u^{n+1}}{n+1}. \quad (6)$$

Полная энергия деформирования исследуемого образца составляет произведение удельной энергии на объем образца, а усилие деформирования – отношения полной энергии к прогибу. Результаты расчета приведены в табл. 1.

На основании изложенного разработан алгоритм расчета усилия деформирования и распределенных нагрузок при прогибе круглых пластин, заземленных по контуру:

1. Измеряются геометрические параметры деформированной области: радиус R , максимальный прогиб f_{max} , толщина листа t и твердость H_T твердомером «ТЕМП-3».

2. Согласно работе [5] определяется исходный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа:

$$\sigma_{0,2} = B + 0,33 H_{T0}, \quad (7)$$

где B – коэффициент, который при измерении твердости твердомером «ТЕМП-3» равен 176; H_{T0} – исходная твердость материала листа, измеренная твердомером «ТЕМП-3».

По формулам [5] определяются коэффициенты аппроксимации кривой течения:

$$A = 1000 \exp(-0,0008 \sigma_{0,2}); \quad (8)$$

$$n = 0,35 \exp(-0,0008 A). \quad (9)$$

3. Для измеренной толщины листа t по графикам (рис. 7, рис. 8) определяются коэффициенты α и β .

4. По формуле (3) рассчитывается интенсивность деформаций, по формуле (5) соответствующая ей интенсивность напряжений.

5. По формуле (1) определяется усилие деформирования, а по формуле (2) – распределенная нагрузка деформирования.

6. Энергия деформации образца определяется как произведение усилия деформирования на максимальный прогиб пластины.

ВЫВОДЫ

Предложен алгоритм расчета усилий деформирования, распределенных нагрузок, а также энергии пластической деформации при прогибе круглых пластин, заземленных по контуру.

Сопоставлены результаты двух методов определения усилия деформирования: по распределению твердости и экспериментально расчетный метод. Установлено, что расхождения составляют около 5 %.

Экспериментально построены тарировочные графики для образцов из стали 08кп. Получены поправочные коэффициенты для расчета усилия деформирования пластин разных толщин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дель Г. Д. *Технологическая механика* / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.
2. Феодосьев В. И. *Сопrotивление материалов* / В. И. Феодосьев. – Наука, 1967. – 552 с.
3. Малинин Н. Н. *Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов ВУЗов* / Н. Н. Малинин. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1975. – 400 с.
4. Огородников В. А. *Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы)* : монография / В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак. – Винница : УНИВЕРСУМ, 2004. – 204 с.
5. Огородников В. А. *Алгоритм определения энергии деформации элементов конструкций из листовых материалов* / В. А. Огородников, В. Е. Перлов, М. И. Побережный // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. праць. – 2008. – С. 135–140.

Перлов В. Е. – ассистент ВНТУ.

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница.

E-mail: perlov@ukr.net