

УДК 539.375

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В ПЛОСКИХ ТЕЛАХ ПРИ НАЛИЧИИ КОНЦЕНТРАТОРОВ

А.С. Соляник, М.Н. Морозов, А.О. Жданова

Томский политехнический университет
E-mail: tpm@tpu.ru

Представлены экспериментальные результаты испытанных плоских образцов с круговым отверстием трех пластичных металлов – сталь, алюминий, латунь. Используя метод делительных сеток, оценивалась предельная деформация, предшествующая появлению трещины в опасном сечении на контуре концентратора. Установлена зависимость предельной деформации от относительного градиента деформаций, подобраны аналитические функции, описывающие эту зависимость. Даны практические рекомендации по оценке уровня деформации на контуре концентратора в опасной точке по относительному изменению его размеров.

Ключевые слова:

Трещина, предельная деформация, градиент, концентратор, пластичный металл.

Key words:

Crack, limit of deformation, gradient, concentrator, plastic metal.

На стадии проектирования технологического процесса обработки заготовок деталей машин необходимо знать величину предельной пластической деформации металла. Теоретические и экспериментальные исследования Ф.И. Рязанова [1] по определению критических деформаций при формоизменении тонколистового металла позволили сделать вывод о том, что они зависят от напряженного и деформированного состояний металла и его механических характеристик. Ранее на эти же параметры указывали и другие исследователи [2–4].

В последних публикациях по исследованию стойкости листовых металлов против разрушения при различном характере деформаций Chen Jieshi [5] в качестве критерия предложил энергию пластической деформации. Предельные деформации [5] прогнозировали посредством этого критерия в сочетании с математическим моделированием процесса формовки при различных видах деформированного состояния металла.

В работе [6] приведен метод расчета предельных пластических деформаций в зоне углового концентратора.

Кроме того, в механике разрушения предельная деформация у острого концентратора (трещины) принята в качестве критерия наступления состояния разрушения [7]. К такому же критерию пришел G.T. Nahp: «распространение трещины начинается тогда, когда достигается уровень местных деформаций, равный критическому» [8]. Поэтому предельная деформация может быть браковочным признаком в технологическом процессе пластической обработки заготовок деталей машин.

Таким образом, предельная деформация является параметром, который используется при решении теоретических задач механики деформируемого тела, прикладных задач по обработке металлов давлением и формовании изделий из листового проката и в качестве критерия в механике разрушения.

Попытки расчетным путем количественно определить величину предельной деформации нельзя считать успешными ввиду ее многофакторности. Поэтому остается актуальной разработка методов непосредственного измерения деформации, а также опосредованно через другие сопутствующие деформациям явления.

Учитывая, что в реальной практике к плоским телам можно отнести огромное множество изделий, у которых один из размеров много меньше двух других (барабаны котлов, корпуса судов водного транспорта, летательных аппаратов, тонкостенные сосуды для хранения жидкостей и газов, быстровращающиеся диски и многие другие) в исследованиях общепризнанной моделью являются пластины, а разные соотношения главных напряжений в опасном сечении можно задать концентратором с разным радиусом закругления.

Для этой цели были изготовлены по 50 образцов из стали Ст3, латуни ЛС59–1 и алюминия АОМ в виде пластин толщиной 2 мм с центральным отверстием. В 25 пластинах диаметр отверстия был 10,75 мм, а ширина варьировалась в пределах от 17 до 100 мм. В других 25 пластинах при постоянной ширине образцов 55 мм варьировались диаметры отверстий от 2 до 22,5 мм. Таким приемом достигались различные соотношения главных напряжений и разный относительный градиент деформации в опасном сечении у контура отверстия:

$$q = \frac{de_y}{dx} \frac{1}{e_{y_{\max}}},$$

где e_y – деформация в опасном сечении у контура отверстия в направлении растягивающего усилия; q – относительный градиент деформации.

Для определения деформаций в опасном сечении образцов нет необходимости разрабатывать новый метод, т. к. разработанные ранее и широко апробированные методы позволяют это сделать. Из всех известных экспериментальных методов

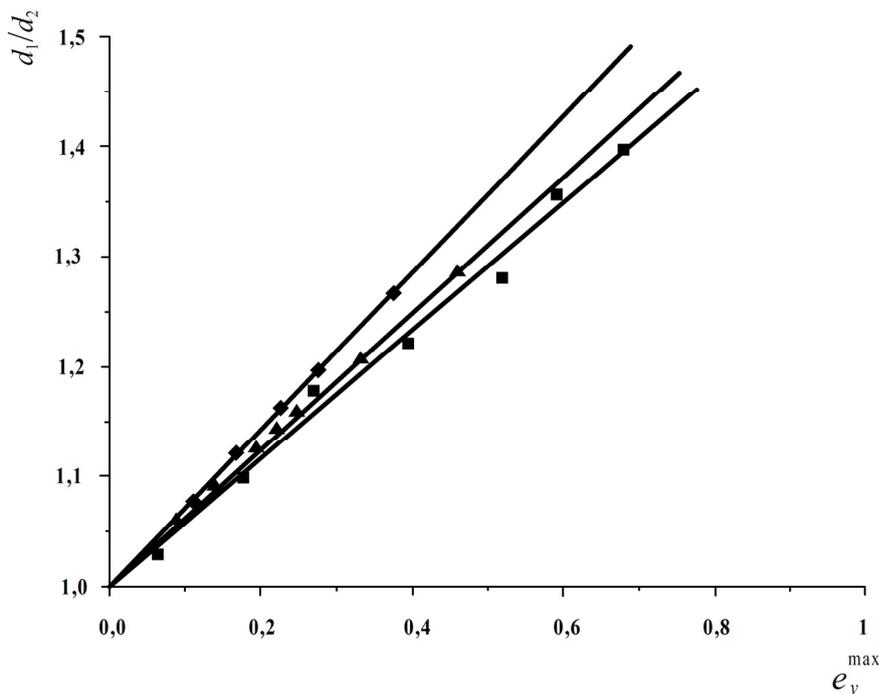


Рис. 1. Зависимость размеров отверстия в двух главных направлениях от e_y^{\max} : \blacklozenge – латунь ЛС59–1, диаметр 4 мм, \blacktriangle – алюминиевый АОМ, диаметр 14 мм, \blacksquare – сталь СтЗ, диаметр 9 мм

был выбран метод делительных сеток, как достаточно точный, наглядный и позволяющий измерять деформации вплоть до разрушения испытуемого образца. Делительная сетка выбиралась с разной базой от 0,1 до 0,5 мм в зависимости от размеров отверстия с учетом рекомендаций [9, 10].

Сетку наносили методом царапания алмазной иглой. Пластина устанавливалась на стол микроскопа БМИ-1 так, чтобы центральная продольная ось образца совпадала с осью поперечного хода стола микроскопа. За счет продольного хода стола микроскопа игла царапала риску толщиной и глубиной не более 5 мкм на полированной поверхности образца в области концентратора. После каждого хода стола поперечным винтом микроскопа стол с образцом перемещался на величину базы сетки. Наносилась следующая риска и т. д. Поворот стола на 90° позволял теми же приемами нанести риски в продольном направлении образца. Образец снимался с микроскопа, и сетка фотографировалась.

Далее образец растягивался на испытательной машине ZDM-4 ступенчатой нагрузкой, составляющей примерно 15 % от усилия разрушения. После каждой нагрузки фотографировалась сетка, измерялись размеры отверстия в двух главных направлениях. Так продолжалось до появления видимой трещины. Увеличенное изображение сетки позволило достаточно легко и точно замерить изменение базы сетки и вычислить логарифмическую деформацию e_y .

Наибольшая деформация e_y^{\max} на каждой ступени наблюдалась на контуре отверстия в опасном сечении. Сопоставление изменения размеров отверстия в двух главных направлениях и предель-

ной деформации на контуре отверстия показало их линейную зависимость (рис. 1). Ширина всех образцов, испытания которых представлены на рис. 1 и 2, составляет 55 мм.

Компьютерная обработка результатов опытов проводилась с использованием математического пакета Curve Expert Version 1.40. Используя интерполятор, подобрали функции, описывающие зависимость $\frac{d_1}{d_2} = f(e_y^{\max})$ для латуни, алюминия и стали соответственно:

$$\frac{d_1}{d_2} = 0,7129e_y^{\max} + 1;$$

$$\frac{d_1}{d_2} = 0,6212e_y^{\max} + 1;$$

$$\frac{d_1}{d_2} = 0,5808e_y^{\max} + 1.$$

В дальнейших опытах при появлении трещины предельную деформацию определяли по этим зависимостям, что исключало погрешность измерения размеров деформированной сетки от наличия трещины. Такой прием использовался для образцов, у которых длина трещины не превышала 1 мм. Образцы с более развитой трещиной исключались из опыта.

На рис. 2 представлены экспериментальные результаты по определению зависимости предельной деформации и относительного градиента деформаций.

Испытания показали, что предельная деформация возрастает при увеличении относительного градиента. Применение математического пакета

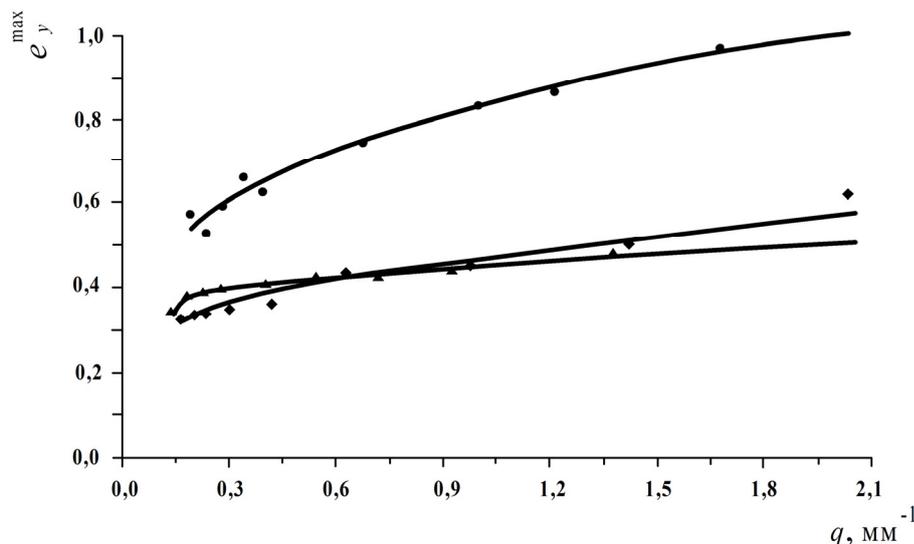


Рис. 2. Зависимости e_y^{\max} от относительного градиента деформации q : ● – сталь Ст3; ▲ – латунь ЛС59-1; ◆ – алюминий АОМ

Curve Expert позволило подобрать функции, описывающие зависимости $e_y^{\max}=f(q)$ для латуни, алюминия и стали соответственно:

$$e_y^{\max} = 0,392 + 0,058q - \frac{0,001}{q^2};$$

$$e_y^{\max} = \frac{0,115 + 5,7q^{0,23}}{11,5 + q^{0,23}};$$

$$e_y^{\max} = \frac{0,124 + 110q^{0,27}}{131,3 + q^{0,27}}.$$

Эти функции могут быть использованы в расчетной практике оценки запаса пластичности нагруженных плоских тел для исследованных материалов.

Заключение

Установлена линейная зависимость изменения формы круглого концентратора от величины деформации на его контуре в опасном сечении. Это позволяет сократить трудоемкость эксперимента, а при эксплуатации плоских деталей с подобными концентраторами напряжений по относительному

изменению размеров концентратора определять деформацию в опасной точке. При конструировании и реализации технологического процесса пластической обработки деталей можно оценивать остаточный резерв деформации.

Для исследуемых металлов (сталь Ст3, латунь ЛС59-1, алюминий АОМ) экспериментально определена предельная деформация, предшествующая появлению трещины у кругового концентратора в плоском теле при разном уровне концентрации деформаций. Получены функции, описывающие зависимость предельной деформации от относительного градиента деформаций.

Показано, что величина предельной деформации определяется уровнем относительного градиента деформаций, с ростом которого возрастает накопленная деформация. Характер этой зависимости аналогичен кривой течения металла.

Относительный градиент деформации может быть принят как критерий, по которому можно определять предельную деформацию при различных видах напряженно-деформированного состояния плоского тела с круговыми концентраторами деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рязанов Ф.И. Определение критических деформаций при формировании тонколистового металла // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – Т. 112. – № 3. – С. 69–74.
2. Weiss V. Material ductility and fracture toughness of metals // Behav. Mater. Kyoto. – 1971. – V. 1. – № 6. – P. 458–474.
3. Бодунова М.Б., Хесин Н.Д., Чернецов В.И. Определение характеристик сопротивляемости материала распространению трещин // Труды Северо-Западного заочного политехнического института. – 1971. – № 16. – С. 79–83.
4. Корчагин А.П. Определение локальной пластической деформации в зоне концентрации напряжений // Заводская лаборатория. – 1973. – Т. 37. – № 5. – С. 601–604.
5. Chen Jieshi, Zhou Xianbin, Chen Jun. Sheet metal forming limit prediction based on plastic deformation energy // J. Mater. Process. Technol. – 2010. – V. 210. – № 2. – P. 315–322.
6. Григорьев Я.Ю., Патлина О.В., Шацкий А.Н. Метод расчета предельных пластических деформаций в зоне углового концентратора // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева. – 2006. – Т. 6. – № 2 (10). – Ч. 2. – С. 319–322.
7. Макклиток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. – М.: Мир, 1970. – 155 с.
8. Hahn G.T., Rosenfield A.R. Local yielding and extension of a crack under plane stress // Acta Metallurgica. – 1965. – V. 13. – № 3. – P. 293–317.
9. Бородин Н.А. Выбор базы делительных сеток для изучения местных пластических деформаций // Заводская лаборатория. – 1961. – Т. 30. – № 1. – С. 253–272.
10. Ренне И.П., Юдин Л.Г. О точности значений локальных деформаций при использовании делительной сетки с малой базой // Заводская лаборатория. – 1967. – Т. 33. – № 1. – С. 311–325.

Поступила 21.03.2011 г.