

УДК 621.7

**М. С. Зародов**, ассистент, **А. Н. Зародова**, ассистент,  
**Ю. В. Майстров**, канд. техн. наук, доцент  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,  
г. Москва, Россия  
Тел: +7 910 449 74 75; E-mail: [maxzar02@mail.ru](mailto:maxzar02@mail.ru)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ СТАЛИ 08ПС

*В статье описан порядок проведения испытаний для построения кривой предельных деформаций (FLC), и приведены результаты для стали 08пс.*

**Ключевые слова:** диаграмма предельных деформаций, кривая предельных деформаций, FLD-диаграмма, сталь 08пс

**M. S. Zarodov, A. N. Zarodova, U. V. Maistrov**

### EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE FORMING LIMIT CURVE FOR STEEL 08

*The article describes the procedure for conducting tests to development a forming limit curve (FLC) and presents the results for steel 08.*

**Keywords:** forming limit diagram, FLD, forming limit curve, FLC, steel 08.

#### 1. Введение

Главной целью моделирования процесса листовой штамповки численными методами является прогнозирование дефектов, возникающих при деформировании [1,2]. В процессе моделирования оцениваются НДС, утонение, пружинение и т.д. Для анализа предельного формоизменения материала при листовой штамповке широко применяются диаграммы предельных деформаций (FLD-диаграммы), которые устанавливают связь между компонентами главных деформаций в момент разрушения.

Диаграмма FLD строится в осях  $\varepsilon_1$ – $\varepsilon_2$  (рис.1) и показывает уровень критических главных деформаций листа из металла конкретной партии, определяется экспериментально для определенной толщины листа, для каждой марки материала, а иногда для каждой партии проката. Для оценки формуемости материала достаточно провести испытания и построить одну кривую, кривую предельных деформаций (FLC) по нескольким точкам, характеризующим разное деформированное состояние. Площадь под кривой FLC охватывает все возможные комбинации деформаций, которые лист выдерживает без разрушения.

#### 2. Основное содержание и результаты работы

Для определения предела формообразования возможны два различных способа:

1. Анализ деформаций на деталях с браком. Этот метод описан в [3].

2. Определение предельных деформаций в ходе специальных испытаний [4].

Данный метод более удобен и универсален.

На плоскую и недеформированную поверхность наносится сетка с точными размерами или стохастический (случайный) узор. Затем эта заготовка деформируется с использованием процедуры Наказимы или Марчиньяка до момента разрушения. Далее проводятся измерения и измеренные деформации обрабатывают таким образом, чтобы исключить из результатов суженную или поврежденную область.

Для точного определения FLC необходимо, чтобы в зоне оценки было почти полное отсутствие трения.

Пределы формообразования определяются для нескольких различных соотношений между  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ . Деформированное состояние варьируется от одноосного растяжения до двухосного растяжения. Совокупность точек в различных состояниях деформации изображаются в виде кривой предельных деформаций. Кривая выражается как функция двух истинных деформаций  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  на поверхности листа и наносится на FLD-диаграмму.

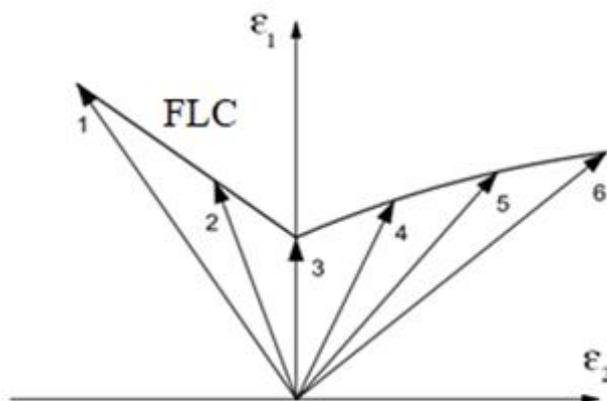


Рисунок 1. Структура FLD-диаграммы.

Согласно [4] существуют 2 основных метода проведения испытаний для построения кривой предельных деформаций: метод Наказимы и метод Марчиньяка.

Метод Наказимы основан на деформации листовых заготовок полусферическим пуансоном. Основными недостатками метода являются трудность наблюдения за течением процесса, сложная система смазочных материалов для создания условий минимального трения.

При испытаниях по методу Марчиньяка деформирование ведется цилиндрическим пуансоном с плоским дном (рис. 2). Для предотвращения контакта между исследуемым образцом и плоской поверхностью пуансона необходимо использовать подкладную заготовку – разрушение произойдет в нужном месте и обеспечит равномерное распределение деформации. Подкладные заготовки должны быть вырезаны из материала, по крайней мере столь же пластичного, как испытываемый материал. Разрушение подкладной заготовки никогда не должно происходить до разрушения исследуемого листового материала. Толщина подкладной заготовки должна быть больше 80% толщины испытываемой заготовки, и их можно использовать несколько штук. Размер подкладной заготовки должен быть равен размеру испытываемого образца. Подкладная заготовка должна иметь центральное отверстие 32-34 мм, центрированное относительно пуансона с качеством кромки, достаточным для преждевременного разрушения. При необходимости подкладную заготовку можно разрезать на две части (перпендикулярно направлению деформации). Полезно увеличить силу трения между испытываемой заготовкой и подкладной заготовкой путем, например, пескоструйной обработки последней.

Перед испытанием смазка наносится на пуансон. Трещина должна образоваться в плоской зоне над отверстием подкладной заготовки.

Фланец заготовки должен быть зафиксирован, чтобы обеспечить равномерность деформации. Возможны следующие способы фиксации: использование перетяжных

ребер, достаточное усилие прижима, зубчатых инструментов или инструментов с накаткой (при условии, что два последних метода не связаны с риском локализации деформации или разрушения заготовки).

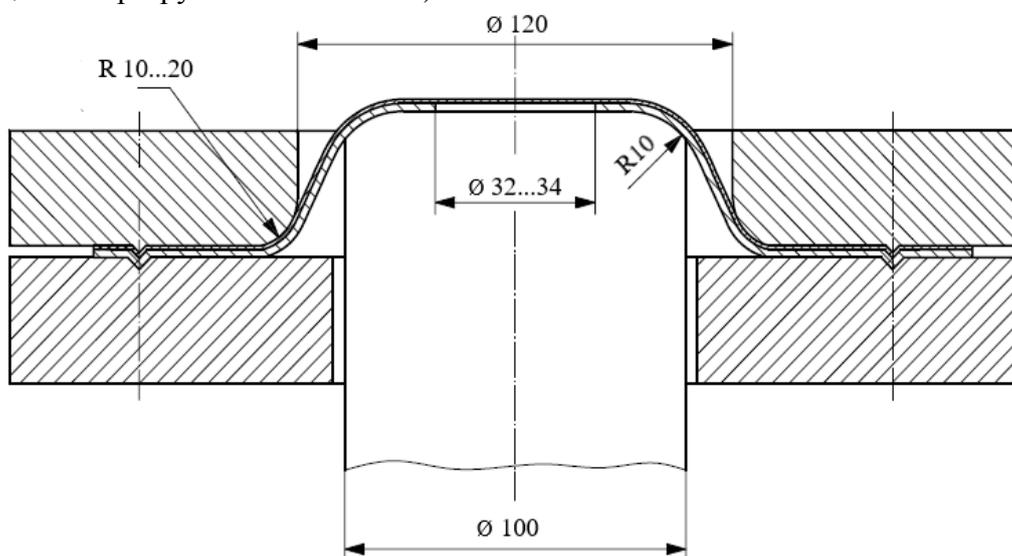


Рисунок 2. Схема инструмента для испытания по Марчиньяку.

Оборудование для испытаний должно обеспечивать постоянную скорость деформирования  $1,5 \pm 0,5$  мм/с. Температура испытания должна составлять  $23 \pm 5^\circ\text{C}$

В качестве образцов для испытаний применяются заготовки различной формы, толщиной от 0,3 до 4 мм. Рекомендуется следующая геометрия образца (рис.3): длина рабочей части 25 мм, радиус скругления  $R = 20$  мм. Величина  $H$  (ширина рабочей части) варьируется от 20 до диаметра заготовки.

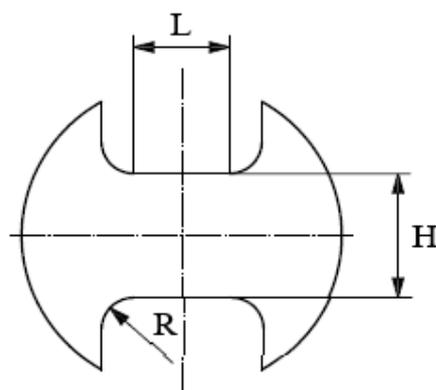


Рисунок 3. Размеры заготовок-образцов для испытаний:  $L$  - длина рабочей части,  $H$  - ширина рабочей части,  $R$  - радиус скругления

При  $\varepsilon_2 > 0$  возможны заготовки с полукруглыми вырезами разного радиуса. Для стали (в основном из мягких марок стали) достаточно прямоугольных полос различной ширины. При внешней круглой форме заготовок достигается более равномерное распределение экспериментальных предельных точек формообразования, чем при использовании прямоугольных полос [5].

Способы получения заготовок должны использоваться, не вызывающие трещин, наклепа или изменения микроструктуры на кромке, чтобы разрушение не началось с края испытываемого образца.

Для описания полного FLC необходимо не менее пяти геометрий. (Рекомендуется равномерное распределение FLC от одноосного до двухосного растяжения.) Если описание полного FLC не требуется, то допускается меньшее количество геометрий, но это должно быть указано в отчете об испытаниях. Используется не менее трех годных образцов каждой геометрии. В данной работе использовались 3 вида образцов толщиной 1 мм:  $H_1 = 20$  мм,  $H_2 = 125$  мм и  $H_3 = 230$  мм.

Для стали направление проката должно быть перпендикулярно шейке образца, для алюминия – параллельно шейке (рис.4).

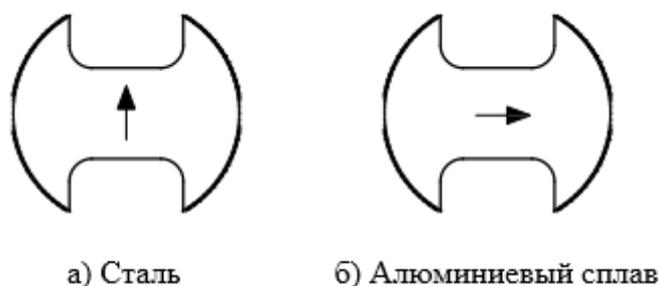


Рисунок 4. Зависимость положения рабочей части образца от направления прокатки для разных материалов

Рекомендуемый размер сетки приблизительно равен толщине материала, но не более 2,5 толщин. Как правило используется сетка 1 или 2 мм. Сетка должна иметь высокий контраст и должна наноситься без эффекта надрезов и/или изменения микроструктуры (рис. 5). Некоторыми распространенными методами нанесения являются электрохимическая, фотохимическая, офсетная печать и перенос сетки.

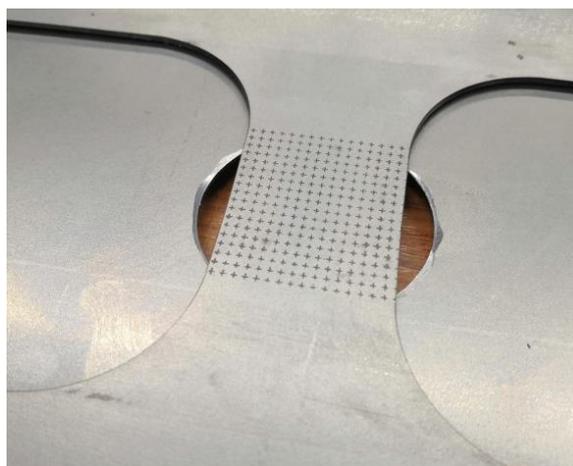


Рисунок 5. Сетка, используемая в эксперименте нанесена на образец электрохимическим способом с шагом 1.5 мм

С камеры, закрепленной непосредственно в оснастке, записывается начальное изображение и последовательность изображений на последних этапах деформирования до появления трещины (рис. 6). Затем определяется направление перпендикулярно трещине на изображении с трещиной и переносится обратно на последнее изображение до того, как трещина становится видимой. Это направление используется для выборки значений  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ .

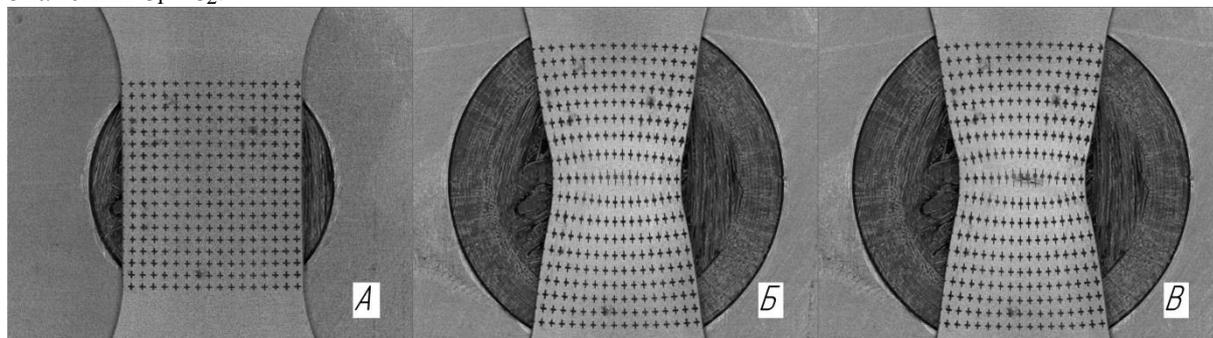


Рисунок 6. Этапы эксперимента для образца с  $H=25$  мм, где А – начальный этап, недеформированный образец, Б – последний этап, перед образованием трещины, В – разрушение образца.

Измерение деформаций происходит любым удобным измерительным устройством. Погрешность измерительного устройства должна быть не более 1 % измеренной длины. Рекомендуются камеры и программное обеспечение, обеспечивающие общую точность измерений более 2 %.

Измерение деформации может быть выполнено либо путем измерения только конечного размера сетки, где известна точность исходной сетки, либо путем сравнения конечного размера сетки относительно исходного.

Были проведены испытания, полученные данные обработаны, по методике, описанной в [4]. Исходные данные и результаты представлены в таблице 1. По этим данным построена кривая предельных деформаций (рис. 7)

Таблица 1. Результаты испытаний по Марчиньяку образцов с разной геометрией

| № | Ширина рабочей части Н, мм | $\varepsilon_1$ | $\varepsilon_2$ |
|---|----------------------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 25                         | 0,52            | -0,22           |
| 2 | 125                        | 0,31            | -0,03           |
| 3 | 230                        | 0,35            | 0,34            |

Образцы без боковых вырезов (3) позволяет получить точку на кривой предельных деформаций, которая соответствует двухосному растяжению ( $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2$ ). Образцы с максимальными вырезами (1) позволяет получить точку, которая приблизительно соответствует одноосному растяжению ( $\varepsilon_1 \approx -2\varepsilon_2$ ). У образцов с шириной рабочей части 125 мм (2) наблюдается практически плоское деформированное состояние ( $\varepsilon_2 \approx 0$ ).

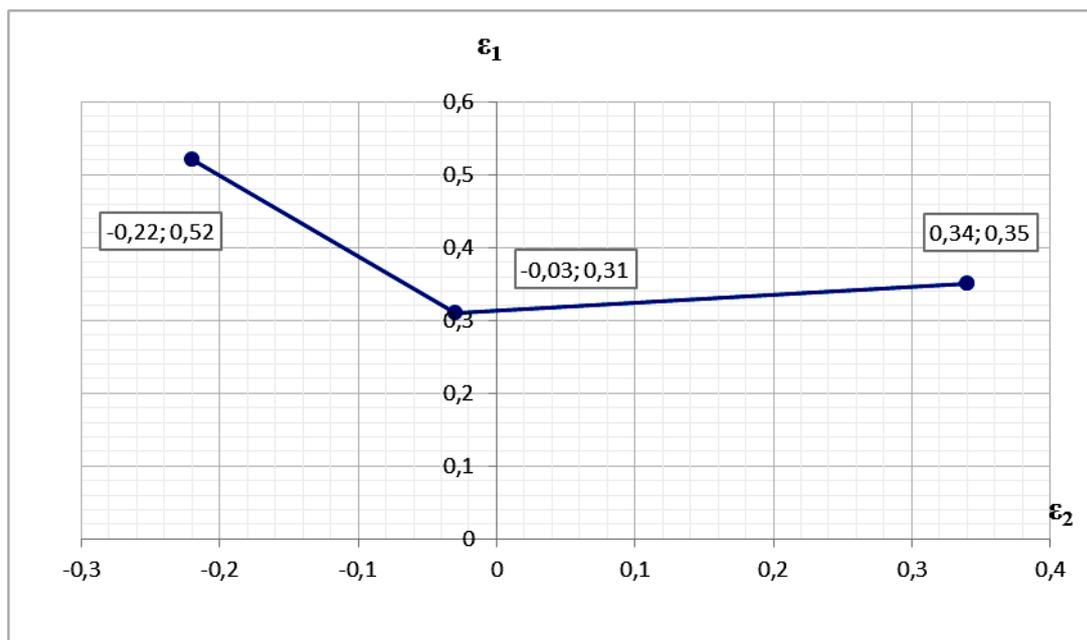


Рисунок 7. Кривая предельных деформаций для стали 08пс

**3. Заключение.** В результате проведенных испытаний экспериментально была построена кривая предельных деформаций для стали 08пс, которая может быть использована в дальнейших исследованиях при моделировании процесса листовой штамповки численными методами.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки / А. В. Власов, С. А. Стебунов, С. А. Евсюков [и др.]. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 384 с. – ISBN 978-5-7038-5101-2.
2. Зародов, М. С. Анализ технологических процессов штамповки теплообменных панелей / М. С. Зародов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 5. – С. 292-297.
3. ISO 12004-1 Metallic materials — Sheet and strip — Determination of forming-limit curves — Part 1: Measurement and application of forming-limit diagrams in the press shop.
4. ISO 12004-2 Metallic materials - Sheet and strip - Determination of forming-limit curves — Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory.
5. Изосимова, С. В. Исследование влияния формы заготовки на точность построения диаграммы предельных деформаций / С. В. Изосимова // Молодежный научно-технический вестник. – 2013. – № 10. – С. 3.

Поступила в редколлегию 28.06.2023 г.