

Технология и технологические машины

УДК 621.98.011:620.173.2

Использование опытов на сдвиг для построения кривых упрочнения листовых материалов

А.В. Власов, А.А. Шитиков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Shear test experiments for determination of sheet materials hardening curves

A.V. Vlasov, A.A. Shitikov

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: anvvlasov@mail.ru, aa-shitikov@yandex.ru

i Кривые упрочнения используют при математическом моделировании пластической деформации. Однако в настоящее время отсутствует общепринятая методика экспериментального определения кривых упрочнения листовых материалов при деформациях, превышающих значения, соответствующие моменту образования шейки в опытах на растяжение. Приведен обзор методов построения кривых упрочнения листовых материалов при больших деформациях. На примере опытов на сдвиг фигурных образцов в условиях холодной деформации описана методика проведения испытаний металлических материалов из листового проката для построения кривых упрочнения в диапазоне истинных деформаций до 0,5. Математическим моделированием методом конечных элементов доказана возможность получения кривых упрочнения с помощью предложенной методики и обоснована рациональная форма образца. Показано, что предложенная форма образца позволяет выполнить деформацию без разрушения. Приведены примеры использования методики для получения кривых упрочнения ряда материалов.

Ключевые слова: опыт, листовые металлические материалы, сдвиг, холодная деформация, кривая упрочнения.

i Hardening curves describe properties of a material and are used in the FE simulation of plastic deformation. At present, there is no common method of experimental determination of sheet materials hardening curves under deformations exceeding the values corresponding to the time of necking in tensile tests. An overview of the methods of determination of hardening curves of sheet materials determination at large deformations is provided. The technique of shear test of shaped samples is described for the determination of hardening curves. A new form of shaped samples is proposed. Shear tests of shaped samples under cold deformation are used to describe the technique of testing rolled sheet materials to determine hardening curves. The proposed shape of samples allows to determinate hardening curves with the true strain range up to 0.5. The justification of the possibility of obtaining hardening curves using the proposed method is performed by FE simulation; and the proposed sample shape is validated. It is shown that the proposed shape of the sample makes it pos-

sible to perform deformation without failure. Examples of using the technique for determination of hardening curves are provided for a number of materials.

Keywords: experiment, sheet materials, shear, cold deformation, hardening curve.

При разработке технологических процессов обработки давлением, в том числе и листовой штамповки, все большее распространение находят программные комплексы, основанные на методе конечных элементов, такие как DEFORM, QForm, LS-DYNA, AutoForm, PAM-Stamp, Stampack, Forge и др. Одним из важнейших исходных данных, используемых для расчета в подобных программах, является кривая упрочнения материала.

Кривые упрочнения должны определяться экспериментально, предпочтительно в условиях одноосного нагружения. Поэтому в качестве базового метода определения кривых упрочнения для листовых материалов используют опыты на растяжение.

Испытания на растяжение в области равномерного удлинения (до истинной деформации, $\sim 0,1 \dots 0,2$ для различных материалов) позволяют очень просто получить кривые упрочнения, так как при одноосном напряженном состоянии главное напряжение равно сопротивлению деформации. Определение истинного напряжения после образования шейки требует коррекции, так как напряженное состояние становится объемным, а деформация локализуется в шейке, что затрудняет ее экспериментальное нахождение. Поэтому точность построения кривой упрочнения после образования шейки невысока. В то же время при холодной деформации листовых заготовок часто наблюдаются деформации более единицы. Экстраполяция кривых упрочнения, полученных по результатам опытов на растяжение в диапазоне деформаций $0,2 \dots 1,0$, может привести к значительным ошибкам, существенным образом влияющим на точность моделирования.

В научной литературе описан целый ряд методик, позволяющий, по мнению авторов, строить кривые упрочнения в диапазоне истинных деформаций до $0,4$. Достаточно полный обзор таких методик приведен в работе [1].

Наибольшее распространение кроме опытов на одноосное растяжение получили испытания на сжатие (осадку) стопки заготовок поперек и вдоль поверхности листа, испытания на двухосное растяжение и испытания на сдвиг.

В испытаниях на поперечное сжатие стопки листовых заготовок [2] используют круглые диски, сложенные в форме цилиндрического

образца. Анализ точности построения кривых упрочнения посредством осадки стопки методом конечных элементов выполнен в работе [3]. Результаты анализа показывают, что при деформациях, больших $0,3$, образцы в стопке, непосредственно примыкающие к деформирующим плитам, перестают деформироваться. Происходит «выдавливание» срединных образцов, что приводит к существенному снижению точности построения кривой упрочнения.

Одноосное сжатие в плоскости листа технически реализовать невозможно, поскольку листовая заготовка потеряет устойчивость. Т. Kuwabara [4] с сотрудниками предложил конструкцию устройства, позволяющего выполнить сжатие на 16% . Однако этого недостаточно чтобы построить кривую упрочнения для моделирования формоизменения металла при листовой штамповке.

В работе [5] авторами данной статьи предложена новая методика определения кривых упрочнения по результатам испытания на продольное сжатие стопки листовых заготовок в условиях плоского деформированного состояния, позволяющая исключить влияние трения на боковых поверхностях за счет использования двух стопок с различным количеством листов. По этой методике можно получить кривые упрочнения в диапазоне деформаций $0 \dots 0,6$. К определенным ограничениям данной методики можно отнести усреднение результатов, поскольку свойства заготовок в стопках могут отличаться.

Некоторые исследователи предлагают строить кривые упрочнения при испытаниях в условиях двухосного растяжения. Для этого используют опыты по формовке сферическим эластичным пуансоном [6] и гидроформовке [7]. К недостаткам таких методик следует отнести их «расчетный» характер, поскольку в процессе опыта сложно непосредственно определить деформации по толщине листа.

Большое распространение получили испытания на простой сдвиг [8–14]. Однако к недостаткам существующих методик следует отнести ограничение максимальных накопленных деформаций величиной $0,3$, что обусловлено появлением трещин.

Цель работы — поиск новой формы фигурной заготовки, позволяющей достигнуть больших значений накопленных деформаций

для повышения точности аппроксимации кривой упрочнения при последующем математическом моделировании методом конечных элементов.

Методики построения кривых упрочнения с помощью испытаний на сдвиг. Кривая упрочнения — графическая зависимость интенсивности напряжений от накопленной деформации в процессе выполнения опыта. Тест на простой сдвиг теоретически позволяет достигнуть больших, по сравнению с испытаниями на одноосное растяжение, деформаций без появления пластической неустойчивости. Применяемая в большинстве исследований схема испытаний приведена на рис. 1.

Образец для таких испытаний, впервые предложенный Miyachi (1984) [9], имеет Ж-образную форму. Боковые полки образца крепят в приспособлении неподвижно, на центральную полку воздействуют подвижной траверсой испытательной машины. В результате, в зонах, соединяющих подвижную и неподвижную полки (на рисунке заштрихованы), возникает напряженное состояние, близкое к чистому сдвигу.

Обработка результатов испытаний базируется на определении эффективных напряжений по Мизесу и накопленных пластических деформаций:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3|I_2(D_\sigma)|}; \quad (1)$$

$$\bar{\epsilon}^p = \int_0^t \dot{\bar{\epsilon}} dt = \int_0^t \sqrt{\frac{4}{3}|I_2(D_{\dot{\epsilon}})|} dt. \quad (2)$$

Здесь $I_2(D_\sigma)$ — второй инвариант девиатора напряжений; $\dot{\bar{\epsilon}}$ — интенсивность скоростей деформаций; $I_2(D_{\dot{\epsilon}})$ — второй инвариант девиатора скоростей деформаций.

Считая, что во всем очаге пластической деформации наблюдается чистый сдвиг, формулы (1), (2) приводят (с учетом двойного очага) к следующему виду:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{P}{H_0 s}; \quad (3)$$

$$\bar{\epsilon}^p = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{h}{\Delta}, \quad (4)$$

где P — текущая сила деформирования; H_0 — начальная высота очага деформации; s — толщина заготовки; h — текущий ход деформирования; Δ — ширина очага пластической деформации (зоны сдвига).

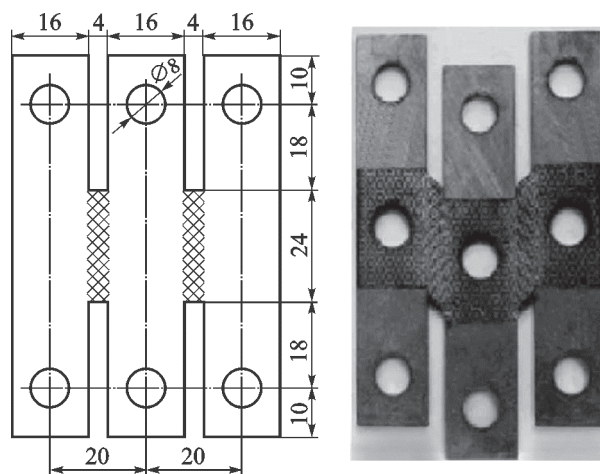


Рис. 1. Заготовка при испытаниях на сдвиг в Volvo Cars Corp. [14]

Графическая зависимость эффективных напряжений от накопленных пластических деформаций представляет собой кривую упрочнения.

Анализ выполненных исследований показывает, что в очаге деформации в опытах на сдвиг отсутствует однородное напряженно-деформированное состояние, деформации проникают под зажимные губки, кроме того, присутствует искажение формы и возможное разрушение в углах. Большинство исследователей констатирует ([6, 12, 14] и др.), что кривые упрочнения, построенные на основе опытов на растяжение и на сдвиг по формулам (3)–(4), отличаются между собой, что является следствием отклонения напряженно-деформированного состояния в очаге деформации от чистого сдвига. Для приведения графиков применяют масштабирование полученной кривой. Методика такого масштабирования [6, 14] описана ниже.

Значительное внимание в литературе уделено выбору формы заготовки, позволяющей достичь наилучших результатов. Возможность применения простой прямоугольной заготовки без вырезов при деформации низкоуглеродистой стали DX54DZ исследована в работе [8].

Влияние геометрических параметров простой прямоугольной заготовки на равномерность распределения напряжений при испытаниях на простой сдвиг рассмотрено в [10]. Кроме отношения длины заготовки к ширине полосы сдвига исследовано также влияние отношения ширины к толщине заготовки. Анализ результатов показывает, что влияние геометрических параметров существует, однако оно не превышает 7 % в наихудшем из рассмотренных случаев.

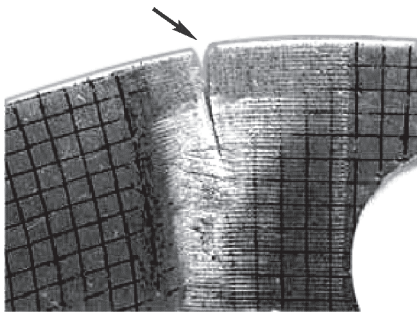


Рис. 2. Разрыв образца при испытаниях [11]

В работах [12–14] выполнено совершенствование формы образцов. Однако во всех приведенных исследованиях удалось достигнуть максимальной накопленной деформации не более 0,3. Основным ограничением являлось исчерпание ресурса пластичности (разрушение) образца в области растяжения (рис. 2).

Обоснование формы образцов для испытания на сдвиг. Основным ограничением для получения больших накопленных деформаций является разрушение. Качественный анализ выполненных ранее исследований показал, что основной недостаток простой плоской заготовки состоит в значительном проникновении очага пластической деформации под зажимные губки, что приводит к существенному отклонению от условий чистого сдвига в очаге пластической деформации. Неравномерность деформаций для традиционного Ж-образного образца меньше, однако, концентрация напряжений на радиусе скругления обуславливает преждевременное разрушение вследствие исчерпания ресурса пластичности. Авторами данной статьи

предложена новая форма образца (рис. 3), которая сочетает в себе преимущества плоского и фигурного Ж-образного образцов.

Основная особенность предлагаемого образца — концентраторы напряжений расположены в зонах сжатия, что препятствует разрушению, а наличие дополнительных вертикальных полков вблизи очага пластической деформации должно снизить неравномерность деформаций. Сила на боковые и центральную недеформирующуюся полки передается как через штифты, так и за счет сил трения от зажима.

Обоснование размеров образца выполнено с помощью моделирования методом конечных элементов в программном комплексе DEFORM [15].

Ряд исследователей использовали моделирование методом конечных элементов для обоснования формы образцов [8, 10]. Моделировался очаг деформации. На боковой границе очага задавали граничные условия, препятствующие горизонтальным перемещениям узлов. Такие граничные условия противоречат реальному закреплению заготовки. В действительности очаг деформации будет проникать под зажимные губки, что вносит существенные погрешности в результаты моделирования.

Расчетная схема, использованная авторами данной статьи, учитывает реальное закрепление заготовки с помощью штифтов, силу трения от затяжки, недеформируемую зону, что позволяет анализировать проникновение очага деформации под зажимные губки. Вследствие симметрии моделировалась 1/4 часть заготовки.

Модель материала заготовки упруго-пластическая, модуль Юнга $2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент

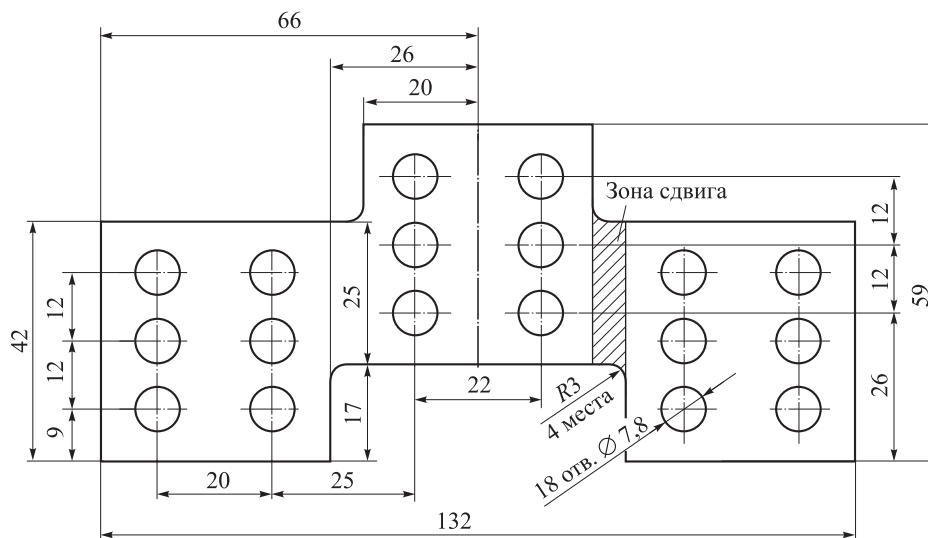


Рис. 3. Предлагаемая форма образца для испытания на сдвиг

Пуассона 0,3. При моделировании использовали степенную аппроксимацию кривой упрочнения стали 08кп вида

$$\sigma_s = 400\epsilon^{0,5} + 240. \quad (5)$$

Такая аппроксимация является удовлетворительным компромиссом для описания противоречивых сведений о реологических свойствах этой стали при холодной деформации, приводящихся в различных источниках, в частности, в работе [16] и базе данных материалов программы DEFORM. Следует отметить, что анализ результатов моделирования, выполненный авторами данной статьи, показал, что полученные выводы мало зависят от вида кривой упрочнения материала.

Закон трения на поверхностях контакта комбинированный, сочетающий закон Кулона при малых контактных давлениях и закон Зибеля при больших:

$$\tau_k = \begin{cases} mk & \text{при } \mu p \geq mk; \\ \mu p & \text{при } \mu p < mk. \end{cases}$$

Здесь $m = 0,12$ — фактор трения; $\mu = 0,1$ — коэффициент трения (что соответствует условиям холодной штамповки); p — текущее давление на контактных поверхностях;

$$k = \sigma_s / \sqrt{3}.$$

Конечно-элементная модель состоит из 11 991 гексагонального конечного элемента 1-го порядка*, имеет 17 032 узла. Сетка неравномерная, средний размер стороны элементов в очаге деформации составляет 0,4 мм, шаг расчета — 0,09 мм перемещения траверсы, общее число шагов 60, максимальное перемещение 5,4 мм. При итерационном решении нелинейных алгебраических уравнений на шаге в программном комплексе DEFORM использован метод Ньютона — Рафсона. Точность по невязкам и приращениям в процессе итераций задана 0,5 %.

Оценку разрушения и локализации деформации проводили по нормализованному критерию Cockroft@Latham [15]:

$$D = \int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon}, \quad (6)$$

* В базе типов конечных элементов комплекса DEFORM доступны только тетраэдральные и гексагональные элементы 1-го порядка. Количество конечных элементов выбрано как разумный компромисс между точностью и временем расчета. Наши тестовые расчеты для рассмотренной модели показали, что уменьшение размеров конечных элементов в очаге пластической деформации в 2 раза (до 0,2 мм) приводит к росту максимальных сдвиговых деформаций в среднем сечении на 2,2 % (с 0,562 до 0,575) при увеличении времени расчета в 5 раз. Максимальная поврежденность по критерию Cockroft@Latham при уменьшении размеров элементов повышается также незначительно — с 0,18 до 0,183 (1,6 %).

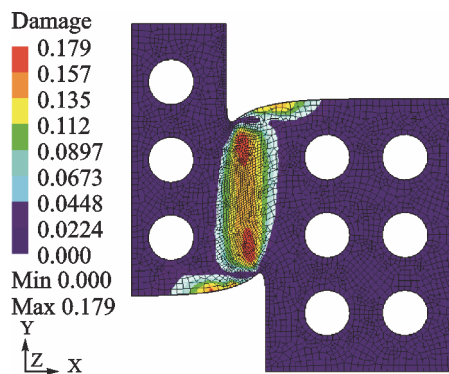


Рис. 4. Поврежденность по критерию Cockroft@Latham при перемещении на 5,4 мм (полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

где σ^* — максимальное главное растягивающее напряжение; $\bar{\sigma}$ — интенсивность напряжений; $\bar{\epsilon}$ — накопленная пластическая деформация; $d\bar{\epsilon}$ — приращение накопленной деформации. Критерий разрушения (6) получил широкое распространение в практике расчетов процессов обработки давлением [17, 18] и является базовым для оценки поврежденности металла в программном комплексе DEFORM [15].

На рис. 4 представлена деформированная форма и распределение поврежденности образца по критерию Cockroft@Latham при перемещении центральной части образца на 5,4 мм, что соответствует средней накопленной деформации 0,52. Предварительный анализ опыта на растяжение показал, что критическое значение критерия Cockroft@Latham для одноосного растяжения (в опасной точке зоны растяжения реального образца напряженное состояние близко к одноосному растяжению) составляет 0,771. Таким образом, разрушение предложенной формы образца не произойдет.

Анализ результатов моделирования показывает, что в очаге пластической деформации наблюдается неравномерное распределение деформаций (рис. 5), что должно отразиться на точности определения кривой упрочнения.

Для оценки погрешности определения кривой упрочнения проведено «виртуальное» испытание по следующей методике:

- 1) моделирование опыта на сдвиг с заданной кривой упрочнения по формуле (5);

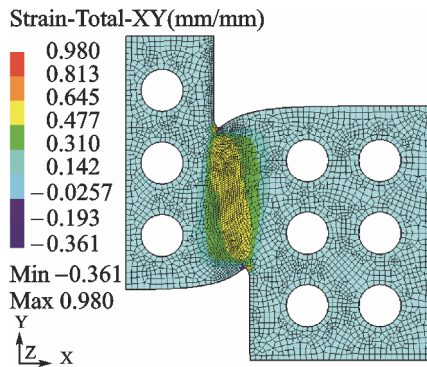


Рис. 5. Сдвиговые деформации при перемещении на 4 мм (полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

- 2) запись в файл полученной зависимости силы деформирования от перемещения;
- 3) обработка данных из файла в соответствии с формулами (3), (4), т. е. в предположении равномерного распределения деформаций;
- 4) сравнение полученной кривой упрочнения с заданной по формуле (5) при моделировании.

Результаты расчета (рис. 6) показывают, что непосредственный пересчет приводит к возникновению значительной погрешности вследствие неравномерности деформации. Подобные результаты получены и при экспериментальных исследованиях [6, 12, 14], что обусловило разработку методики корректировки результатов опытов на сдвиг по результатам опытов на одноосное растяжение.

Наибольшее распространение получил метод определения корректирующего коэффициента путем сравнения с точкой, соответствующей моменту образования шейки на кривой испытаний на растяжение [6, 14]:

$$k_{ш} = \frac{\sigma_u(\epsilon_{ш})}{\sigma_{sh}(\epsilon_{ш})}. \quad (7)$$

Здесь $\sigma_u(\epsilon_{ш})$ — истинное напряжение в момент образования шейки при одноосном растяжении; $\sigma_{sh}(\epsilon_{ш})$ — эквивалентное напряже-

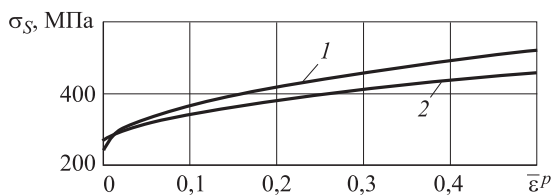


Рис. 6. Сравнение кривой упрочнения заданной в DEFORM (1) и кривой упрочнения, полученной обработкой результатов виртуального испытания на сдвиг (2)

ние, соответствующее накопленной деформации $\bar{\epsilon}^p = \epsilon_{ш}$ в опытах на сдвиг.

Результирующая кривая упрочнения образуется путем суммирования двух участков — кривой упрочнения по результатам опытов на растяжение до момента образования шейки и масштабированной кривой по результатам опытов на сдвиг после образования шейки:

$$\sigma_s(\epsilon) = \begin{cases} \sigma_u(\bar{\epsilon}^p) & \text{при } 0 \leq \bar{\epsilon}^p \leq \epsilon_{ш}; \\ k_{ш} \sigma_{sh}(\bar{\epsilon}^p) & \text{при } \bar{\epsilon}^p > \epsilon_{ш}. \end{cases} \quad (8)$$

Сравнение кривой упрочнения, вычисленной таким способом, с кривой упрочнения, заданной в DEFORM, приведено на рис. 7. Погрешность определения кривой упрочнения в этом случае не превышает 3 %.

Экспериментальные исследования. Испытанию подвергали стали 08Ю толщиной 0,8 и 3 мм.

Предварительно проводили испытания на растяжение на испытательной машине Instron DX600 до момента образования шейки на образце. Скорость перемещения подвижной траверсы задавали равной 5 мм/мин. Деформацию рассчитывали по перемещению, которое измеряли навесным экстензометром Instron. Силу измеряли встроенным датчиком силы испытательной машины.

Испытания на сдвиг также проводили на испытательной машине Instron DX600, установленной в лаборатории кафедры «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Н.Э. Баумана, с использованием специально сконструированной оснастки.

Экспериментальное определение кривых упрочнения проводили по следующей методике:

- 1) построение кривой упрочнения материала на основании опытов на растяжение;
- 2) подготовка фигурных образцов предложенной формы;
- 3) настройка программы испытательной машины таким образом, чтобы перемещение

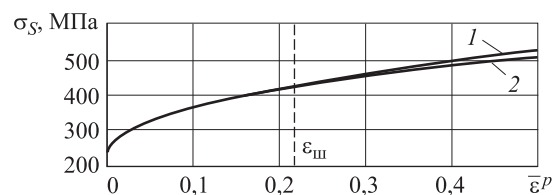


Рис. 7. Результаты виртуального эксперимента на сдвиг с учетом корректировки: 1 — заданная кривая; 2 — кривая, полученная по формуле (7)

рабочего органа было равно ширине рабочей зоны сдвига. Накопленная деформация при сдвиге в этом случае приблизительно равна 0,57;

4) выполнение испытаний с записью диаграммы испытания в файл данных в формате «перемещение–сила»;

5) разгрузка образца до нулевой нагрузки с записью диаграммы разгрузки в формате «перемещение–сила» (необходимо для исключения упругой деформации испытательной машины, оснастки и образца);

6) программное исключение упругих деформаций с помощью специально созданной подпрограммы;

7) определение истинных напряжений и накопленных деформаций в эксперименте по формулам (3), (4);

8) сравнение кривых упрочнения по результатам испытаний на растяжение и сдвиг, вычисление корректирующего коэффициента по формуле (6);

9) определение кривой упрочнения во всем диапазоне измерений путем объединения двух участков по формуле (7).

Образцы изготовляли электроэрозионным методом из нескольких листов, предварительно собранных в пакет, что обеспечило практически идентичные размеры образцов.

Сравнение кривых упрочнения, полученных по результатам испытания образцов на растяжение и сдвиг без применения корректирующего коэффициента, выявило их различие (рис. 8), что согласуется с исследованиями других авторов. Следуя методике, изложенной выше, масштабировали кривую упрочнения на сдвиг по формулам (6), (7). Для истинной деформации $\epsilon_{ш} = 0,2109$, соответствующей моменту образования шейки при одноосном растяжении, вычислили значение корректировочного коэффи-

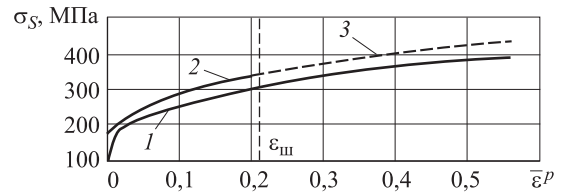


Рис. 8. Корректировка кривой упрочнения, полученной с помощью испытания на сдвиг образцов из стали 08Ю:

a — толщиной 0,8 мм; б — толщиной 3 мм; 1 — сдвиг; 2 — растяжение; 3 — скорректированный сдвиг

циента $k_{ш} = 1,123$. Результаты корректировки представлены на рис. 8.

Полученное в результате испытаний значение корректировочного коэффициента $k_{ш} = 1,123 > 1$ качественно соответствует $k_{ш} > 1$, определенному в результате математического моделирования.

Были вычислены степенная $\sigma_{pw}(\epsilon) = 382,33 \epsilon^{0,44} + 145,666$, МПа, и логарифмическая $\sigma_{ln}(\epsilon) = 122,608 \ln(\epsilon + 0,082) + 491,38$, МПа, аппроксимации полученной кривой упрочнения с коэффициентами корреляции 0,9997 и 0,999 соответственно. Результаты аппроксимации представлены на рис. 9, а.

Полученную кривую упрочнения можно использовать до максимальной истинной деформации 0,555.

Данные эксперимента по определению кривой упрочнения образцов из листа толщиной 3 мм обрабатывали по той же методике.

Для истинной деформации $\epsilon_{ш} = 0,24082$, соответствующей моменту образования шейки при одноосном растяжении, рассчитано значение корректировочного коэффициента $k_{ш} = 1,184$.

Вычислены степенная $\sigma_{pw}(\epsilon) = 440,313 \times \epsilon^{0,397} + 104,876$, МПа, и логарифмическая $\sigma_{ln}(\epsilon) = 123,016 \ln(\epsilon + 0,058) + 507,341$, МПа, ап-

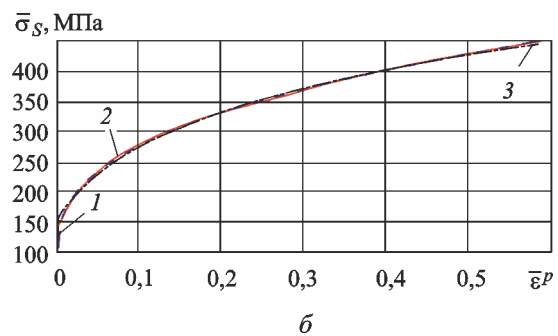
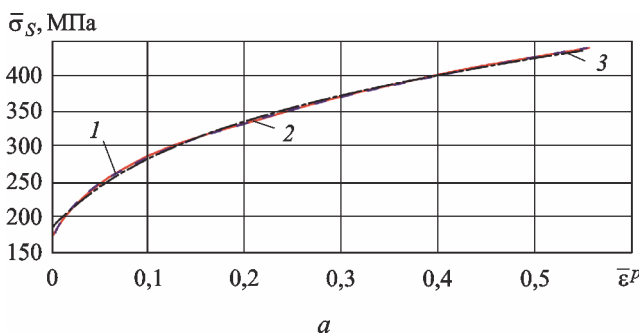


Рис. 9. Аппроксимация кривой упрочнения, полученной с помощью испытания на сдвиг образцов из стали 08Ю толщиной 0,8 мм:

1 — расчетная кривая упрочнения; 2 — аппроксимация степенной функцией; 3 — аппроксимация логарифмической функцией

(полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

проксимации кривой упрочнения с коэффициентами корреляции 0,9995 и 0,9987 соответственно. Результаты аппроксимации представлены на рис. 9, б.

Найденная кривая упрочнения может использоваться до максимальной истинной деформации 0,538.

Таким образом, предложенная новая форма заготовки для испытания на сдвиг и созданная экспериментальная оснастка позволили достигнуть при испытаниях на сдвиг истинных деформаций, в 2 и более раз превышающих истинные деформации в момент образования шейки в опытах на одноосное растяжение без потери устойчивости и разрушения образца. Такое расширение предела экспериментального определения сопротивления деформации листовых материалов обеспечивает более точную аппроксимацию экспериментальных кривых упрочнения, что, в свою очередь, повышает точность моделирования технологических процессов обработки металлов давлением методом конечных элементов. Методика испытаний на сдвиг может быть рекомендована для построения кривых упрочнения листовых материалов.

Выводы

1. Испытаниям на сдвиг характерна неравномерность распределения деформаций в очаге

пластической деформации, что приводит к существенным неточностям при построении кривых упрочнения на основании простых аналитических зависимостей.

2. Экспериментальные исследования выявили различие кривых упрочнения, построенных по результатам опытов на растяжение и сдвиг, что объясняется неравномерностью деформации.

3. Новая форма фигурной заготовки для испытаний на сдвиг позволяет достичь накопленных деформаций до 0,5 и более без разрушения.

4. В результате экспериментальных исследований установлено хорошее качественное совпадение кривых упрочнения, полученных при обработке результатов математического моделирования испытаний на сдвиг, с кривыми, использовавшимися в качестве исходных данных.

5. Построение кривых упрочнения возможно на основании обработки результатов опытов на сдвиг с использованием поправочного коэффициента для момента образования шейки в опытах на растяжение. Результирующая кривая упрочнения образуется из двух участков — кривой упрочнения по результатам опытов на растяжение до момента образования шейки и масштабированной кривой по результатам опытов на сдвиг — после образования шейки.

Литература

- [1] Kuwabara T. Advances In Experiments On Metal Sheets And Tubes In Support Of Constitutive Modeling And Forming Simulations. *International Journal of Plasticity*, 2007, vol. 23, iss. 3, pp. 385–419.
- [2] Merklein M., Kuppert A. A Method For The Layer Compression Test Considering The Anisotropic Material Behavior. *International Journal of Material Forming*, 2009, vol. 2, iss. SUPPL. 1, pp. 483–486.
- [3] Алимов А.И., Власов А.В. Теоретическое обоснование возможности построения кривых упрочнения с помощью испытаний на сжатие стопки перпендикулярно плоскости листа. *Обработка материалов давлением*, 2013, № 1(34), с. 65–72.
- [4] Kuwabara T., Morita Y., Miyashita Y., Takahashi S. Elastic-Plastic Behavior of Sheet Metal Subjected to In-plane Reverse Loading. *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, 1995, 36–414, pp. 768–774.
- [5] Власов А.В., Майстров Ю.В., Алимов А.И., Пономаренко А.Б. Построение кривых упрочнения листовых материалов с помощью опытов на продольное сжатие. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2014, вып. 10, ч. 1, с. 43–56.
- [6] Sigvant M., Mattiasson K., Vegter H., Thilderkvist P. A viscous pressure bulge test for the determination of a plastic hardening curve and equibiaxial material data. *International Journal of Material Forming*, 2009, vol. 2, iss. 4, pp. 235–242.
- [7] Güner A., Brosius A., Tekkaya A.E. Analysis of the hydraulic bulge test with FEA concerning the accuracy of the determined flow curves. *Key Engineering Materials*, 2009, vol. 410–411, pp. 439–447.
- [8] An Y.G., Vegter H., Heijne J. Development of simple shear test for the measurement of work hardening. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, iss. 9, pp. 4248–4254.

- [9] Miyauchi K. A proposal of a planar simple shear test in sheet metals. *Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Res. (Jpn)*, 1984, vol. 78, no. 3, pp. 27–40.
- [10] Bouvier S., Haddadi H., Levee P., Teodosiu C. Simple shear tests: Experimental techniques and characterization of the plastic anisotropy of rolled sheets at large strains. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 172, iss. 1, pp. 96–103.
- [11] Genevois P. *Etude experimental et modelisation du comportement plastique anisotrope de toles dacier en grandes deformations*. Ph. D. Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 1992, 166 p.
- [12] Merklein M., Biasutti M. A Contribution to the Optimization of a Simple Shear Test. *Key Engineering Materials*, 2009, vol. 410–411, pp. 467–472.
- [13] Merklein M., Biasutti M. Forward and Reverse Simple Shear Test Experiments for Modeling in Forming Simulations. *Special Edition: 10th International Conference on Technology of Plasticity*, 2011, pp. 702–707.
- [14] Mattiasson K., Sigvant M. Material Characterization and Modeling for Industrial Sheet Forming Simulations. *MATERIALS PROCESSING AND DESIGN: Modeling, Simulation and Applications – NUMIFORM 2004-Proceedings of the 8th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes. – AIP Publishing*, 2004, vol. 712, no. 1, pp. 875–880.
- [15] *DEFORMTM 3D Version 10.1. User's Manual*.
- [16] Аверкиев А.Ю. *Методы оценки штампуемости листового металла*. Москва, Машиностроение, 1985. 176 с.
- [17] Боткин А.В., Валиев Р.З., Степин П.С., Баймухаметов А.Х. Оценка поврежденности металла при холодной пластической деформации с использованием модели разрушения Кокрофта–Латама. *Деформация и разрушение материалов*, 2011, no. 7, с. 17–22.
- [18] Watanabe A., Fujikawa S., Ikeda A., Shiga N. Prediction of Ductile Fracture in Cold Forging. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 81, pp. 425–430.

References

- [1] Kuwabara T. Advances In Experiments On Metal Sheets And Tubes In Support Of Constitutive Modeling And Forming Simulations. *International Journal of Plasticity*, 2007, vol. 23, iss. 3, pp. 385–419.
- [2] Merklein M., Kuppert A. A Method For The Layer Compression Test Considering The Anisotropic Material Behavior. *International Journal of Material Forming*, 2009, vol. 2, iss. SUPPL. 1, pp. 483–486.
- [3] Alimov A.I., Vlasov A.V. Teoreticheskoe obosnovanie vozmozhnosti postroeniia krivykh uprochneniia s pomoshch'iu ispytaniia na szhatie stopki perpendikuliarno ploskosti lista [The theoretical justification of the possibility of constructing hardening curves using compression tests stack perpendicular to the plane of the sheet]. *Obrabotka materialov davleniem [Materials processing pressure]*. 2013, no. 1(34), pp. 65–72.
- [4] Kuwabara T., Morita Y., Miyashita Y., Takahashi S. Elastic-Plastic Behavior of Sheet Metal Subjected to In-plane Reverse Loading. *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, 1995, 36–414, pp. 768–774.
- [5] Vlasov A.V., Maistrov Iu.V., Alimov A.I., Ponomarenko A.B. Postroenie krivykh uprochneniia listovykh materialov s pomoshch'iu opytov na prodol'noe szhatie [The construction of hardening curves of sheet materials with the help of tests on the longitudinal compression]. *Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki [Proceedings of the TSU. Technical sciences]*. 2014, iss.10, pt. 1, pp. 43–56.
- [6] Sigvant M., Mattiasson K., Vegter H., Thilderkvist P. A viscous pressure bulge test for the determination of a plastic hardening curve and equibiaxial material data. *International Journal of Material Forming*, 2009, vol. 2, iss. 4, pp. 235–242.
- [7] Güner A., Brosius A., Tekkaya A.E. Analysis of the hydraulic bulge test with FEA concerning the accuracy of the determined flow curves. *Key Engineering Materials*, 2009, vol. 410–411, pp. 439–447.
- [8] An Y.G., Vegter H., Heijne J. Development of simple shear test for the measurement of work hardening. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, iss. 9, pp. 4248–4254.

- [9] Miyauchi K. A proposal of a planar simple shear test in sheet metals. *Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Res. (Jpn)*, 1984, vol. 78, no. 3, pp. 27–40.
- [10] Bouvier S., Haddadi H., Levee P., Teodosiu C. Simple shear tests: Experimental techniques and characterization of the plastic anisotropy of rolled sheets at large strains. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 172, iss. 1, pp. 96–103.
- [11] Genevois P. *Etude experimental et modelisation du comportement plastique anisotrope de toles dacier en grandes deformations*. Ph. D. Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 1992, 166 p.
- [12] Merklein M., Biasutti M. A Contribution to the Optimization of a Simple Shear Test. *Key Engineering Materials*, 2009, vol. 410–411, pp. 467–472.
- [13] Merklein M., Biasutti M. Forward and Reverse Simple Shear Test Experiments for Modeling in Forming Simulations. *Special Edition: 10th International Conference on Technology of Plasticity*, 2011, pp. 702–707.
- [14] Mattiasson K., Sigvant M. Material Characterization and Modeling for Industrial Sheet Forming Simulations. *MATERIALS PROCESSING AND DESIGN: Modeling, Simulation and Applications – NUMIFORM 2004-Proceedings of the 8th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes. – AIP Publishing*, 2004, vol. 712, no. 1, pp. 875–880.
- [15] *DEFORM 3D Version 10.1. User's Manual*.
- [16] Averkiev A.Iu. *Metody otsenki shtampuemosti listovogo metalla* [Methods for assessing formability of sheet metal]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985. 176 p.
- [17] Botkin A.V., Valiev R.Z., Stepin P.S., Baimukhametov A.Kh. Otsenka povrezhdennosti metalla pri kholodnoi plasticheskoi deformatsii s ispol'zovaniem modeli razrusheniia Kokrofta–Latama [Evaluating the metal damage during cold plastic deformation using the Cockroft–Latham fracture model]. *Deformatsiia i razrushenie materialov* [Deformation and Fracture of Materials]. 2011, no. 7, pp. 17–22.
- [18] Watanabe A., Fujikawa S., Ikeda A., Shiga N. Prediction of Ductile Fracture in Cold Forging. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 81, pp. 425–430.

Статья поступила в редакцию 24.02.2015

Информация об авторах

ВЛАСОВ Андрей Викторович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки давлением». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: anvvlasov@mail.ru).

ШИТИКОВ Андрей Андреевич (Москва) — аспирант кафедры «Технологии обработки давлением». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: aa-shitikov@yandex.ru).

Information about the authors

VLASOV Andrey Victorovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technologies of Processing by Pressure. BMSTU (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: anvvlasov@mail.ru).

SHITIKOV Andrey Andreevich (Moscow) — Postgraduate, Department of Technologies of Processing by Pressure. BMSTU (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: aa-shitikov@yandex.ru).