

УДК539.3

А.Е. МОЙСЕЙЧИК

аспирант<sup>1</sup>

E-mail: ja-kytik\_89@mail.ru

Ю.В. ВАСИЛЕВИЧ, д-р физ.-мат. наук, профессор

заведующий кафедрой «Сопротивление материалов машиностроительного профиля»<sup>1</sup>

E-mail: vasilevich@bsu.by

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Е.А. МОЙСЕЙЧИК, канд. техн. наук, доцент

E-mail: moisseitchik@mail.ru

Поступила в редакцию 01.07.2015.

## ДЕФОРМАЦИОННЫЙ НАГРЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ТИПА ЛЮДВИКА–ШЕЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

*Установлен ряд закономерностей деформирования и разрушения цилиндрических образцов типа Людвига–Шея. Показано, что деформационный нагрев гладких образцов повышает температуру поверхности до (40–100) °С. На участках с выточками всплеск температуры заметно ниже вследствие меньшего объема деформируемого металла. Увеличение скорости перемещения траверсы от (0,8–1,6) мм/с до (33,3–98,9) мм/с приводит к росту температуры поверхности в 2,5–3 раза (до 80–90) °С.*

**Ключевые слова:** деформирование, образцы с выточками, пластические деформации, температура

Основные закономерности деформационного теплообразования будем исследовать на осесимметричных образцах Людвига–Шея (P. Ludwik и R. Scheu) [1]. Классические образцы Людвига–Шея [1] позволяют установить поведение пластичной стали в образцах с конструктивными дефектами. На таких образцах можно моделировать неравномерность напряженно-деформированного состояния и проследивать изменение механических характеристик стали при переходе от пластичного состояния стали к хрупкому в опасном сечении [2, 3]. В 50-х годах прошлого столетия венгерский ученый Л. Жильмо [4] в своих исследованиях показал, что предельную удельную энергию деформации стали можно считать постоянной величиной при данной температуре и рассматривать как критерий прочности материала. Подобные воззрения развивались и другими учеными [5, 6]. Эксперименты Людвига и Шея [1] показывают, что величина предельной энергии деформации существенно зависит от наличия концентраторов в образце, которые приводят к изменению энергии разрушения образца. Накапливаемая в образцах механическая энергия деформации при нагружении превращается в тепло и изменяет температуру материала. Таким образом, исследуя нагрев образцов типа Людвига–Шея можно надеяться на выявление новых закономерностей в процессе зарождения и развития разрушения в стальных элементах с концентраторами (дефектами).

Цель настоящей статьи — экспериментально выявить закономерности деформационного теплообразования в образцах типа Людвига–Шея.

**Образцы и особенности их экспериментальных исследований.** Изготовить образцы, полностью идентичные исследованным Людвигом и Шеем, затруднительно из-за сложностей в подборе полуфабрикатов. Поэтому образцы изготавливали из близкой по составу и механическим свойствам современной гладкой арматурной стали А240. Для предотвращения перегрева образцы при вытачивании на токарном станке обильно поливали охлаждающей жидкостью. Общий вид образцов представлен на рисунке 1. Выточка образца «f» изготавливалась токарным резцом шириной 1 мм до глубины 3,5 мм. Далее со шлифованным до толщины 0,38 мм ножовочным полотном наносился надрез на глубину 0,5 мм (при медленном вращении образца в токарном станке). У показанных на рисунке 2 образцов «a–f» поверхности средних, после токарной обработки, участков «зачернены» (покрыты сломом сажи). Дополнительно, по изложенной технологии, была изготовлена вторая серия образцов «a–e». Обе серии образцов испытывались на растяжение при двух различных скоростях деформирования. Образцы типа Людвига и Шея имеют одиночный вырез в средней части. Коэффициент концентрации напряжений образцов «a–f» изменяется в пределах от 1 (образец «a») до 14 (образец «f»). Условия деформирования материала стержня и теплообразование в нем изменяются, если на стержень будет нанесена группа выточек. Растяжение образцов типа Людвига–Шея производилось на разрывной машине ИР 5057-5. В процессе экспериментальных исследований нагружение образцов из малоуглеродистой стали производилось квазистатически, растягивающим усилием до разрушения, с записью диаграммы «нагрузка–удлинение». Испытания и их

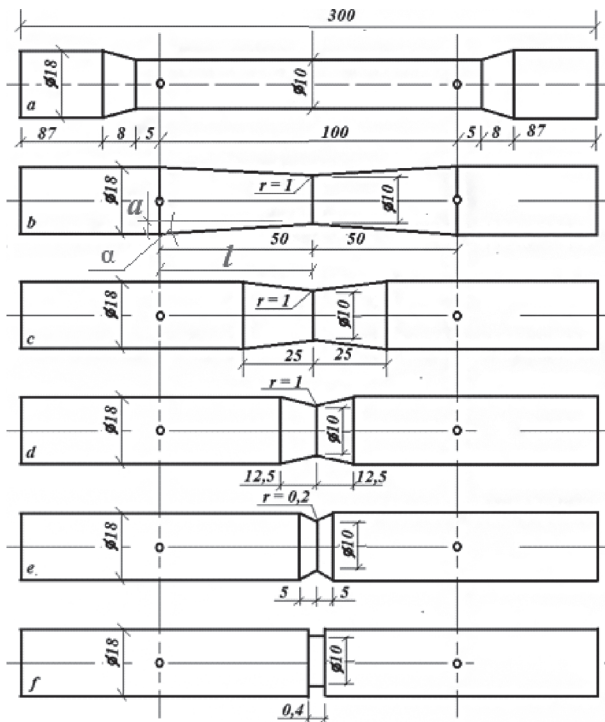


Рисунок 1 — Схема и размеры экспериментальных образцов типа Людвика—Шея

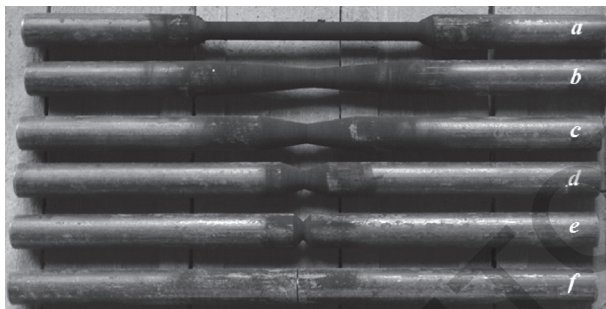


Рисунок 2 — Вид экспериментальных образцов типа Людвика—Шея

обработка проводилась в соответствии с требованиями ГОСТ 1497. Процесс деформирования образцов отображался в термофильмах с помощью компьютерного термографа «ИРТИС-2000». Параллельно велось фотофиксирование процесса деформирования образцов.

После разрушения образцов измерялись геометрические размеры (длины, изменения поперечных сечений), фотографировались характерные виды образцов и их фрагментов, изломы. Обработка результатов термографирования велась по программному пакету IRTIS.

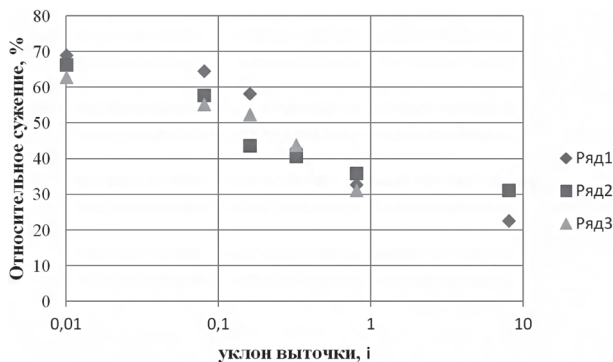
**Закономерности деформирования образцов типа Людвика—Шея.** Выполненные экспериментальные исследования образцов Людвика—Шея позволяют установить ряд особенностей деформирования материала в зоне выточки.

1. При пластических деформациях материала в выточке постепенно в работу включается материал примыкающих к ней участков образцов. Это подтверждается развитием на поверхности образцов

полос скольжения, проявителем которых явились зачерненные сажей поверхности и хрупкая корочка окалины, равномерно покрывающая поверхность образца. Осыпание сажи и последующее отслоение окалины при нагружении происходило по направлениям полос сдвига. Это наблюдалось на последовательных кадрах видео- и фотосъемки процесса деформирования. Вид этих полос после разрушения образцов показан на рисунке 3, из которого следует, что образование шейки в образцах «а–f» происходило в не одинаковых условиях. В образце «а» шейка зарождалась и развивалась в не стесненных, свободных условиях. В образцах «b–d» заметно последовательное уменьшение от «b» к «d» длины участка, на котором развивается шейка, т. е. с ростом уклона берегов выточки происходит возрастающая локализация пластической деформации. В выточке образца «с» характерное для шейки локальное утонение трудно обнаружить. В образцах «e, f» оно имеет место. Для этих образцов заметно активное включение в работу металла смежных с выточкой участков (см. рисунок 3). В результате деформации диаметр смежного участка уменьшился на 0,1–0,7 мм, т. е. из смежных к надрезу участков материал вытягивается в направлении выточки. Можно предполагать, что материал уступа у выточки работает в составе кольцевого ребра жесткости, ограничивающего свободное деформирование выточки. Приведенная на рисунке 4 зависимость относительного сужения ( $\psi$ ) выточки от уклона берегов выточки  $i$  подтверждает существенное влияние жесткости участка, примыкающего к выточке, на величину  $\psi$ . Эти величины рассчитывались:  $\psi$  — по ГОСТ 1497-84, а уклон принимался равным  $i = \operatorname{tg} \alpha = a/l$  ( $\alpha$ ,  $a$ ,  $l$  показаны на рисунке 1). На рисунке 4 видно резкое изменение наклона касательной к кривой  $\psi = f(i)$  при  $i \geq 0,16$ . Сопоставление изломов образцов с кривой рисунка 4 показывает, что при  $i \geq 0,16$  изменяется вид излома образцов: излом происходит «макроотрывом», у наружного периметра излома исчезают участки среза. В статье [7] высказано предположение, что развитие разрушения в пластичном металле определяется 1-м инвариантом тензора напряженного состояния в наиболее нагруженных точках опасного сечения.



Рисунок 3 — Вид образцов 1-й серии после испытания (скорость подвижной траверсы 0,8–1,6 мм/с)

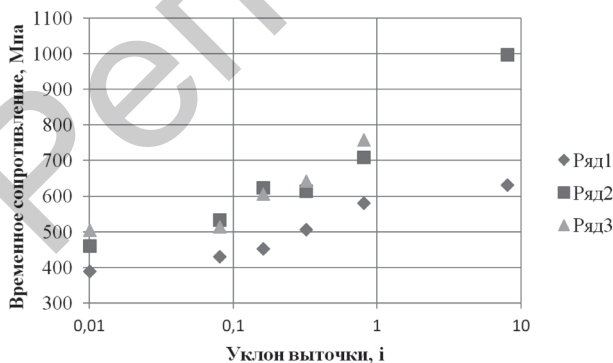


**Рисунок 4** — Изменение относительного сужения  $\psi$ , %, с увеличением уклона выточки в образцах типа Людвика–Шея: ряд 1 — данные Людвика–Шея [1]; ряд 2 — данные авторского эксперимента (скорость траверсы — 0,8–1,6 мм/с), ряд 3 — данные авторского эксперимента (скорость траверсы — 33,3–98,9 мм/с)

Можно допустить, что это явление имеет место и при разрушении образцов Людвика–Шея. Однако, это допущение требует проверки.

2. Из рисунка 5 следует, что рост уклона  $i$  приводит к значительному увеличению временного сопротивления пластичной стали в окрестности выточки. При этом в статье [1] показано, что истинное сопротивление разрыву с ростом уклона  $i$  изменяется незначительно. Эту зависимость можно использовать для обеспечения равнопрочности ослабленного сечения стержня основному (неослабленному). В силу этого нежелательно создавать условия для возникновения «макроотрыва» в расчетном сечении, особенно для стержней из менее пластичной стали.

**Деформационный нагрев образцов типа Людвика–Шея при квазистатическом растяжении.** На термограммах образца «а» видно волновое развитие деформаций в стержне. При этом больший разогрев материала происходит вблизи неподвижной (нижней) траверсы. Из температурных графиков следует, что тепловые волны распространяются вдоль стержня вплоть до момента локализации деформации (образования шейки). Из рисунка 6 видно, что резкий нагрев происходит в зоне образования шейки.



**Рисунок 5** — Возрастание временного сопротивления с увеличением уклона выточки в образцах типа Людвика–Шея: ряд 1 — данные Людвика–Шея [1]; ряд 2 — данные авторского эксперимента (скорость траверсы — 0,8–1,6 мм/с); ряд 3 — данные авторского эксперимента (скорость траверсы — 33,3–98,9 мм/с)

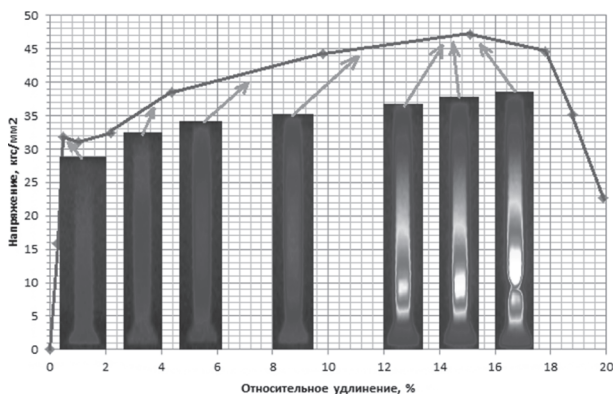
Зафиксированная максимальная температура контрольной поверхности не превышала 30,58 °С.

Особенностью теплообразования в образцах с выточками является то, что вследствие повышения временного сопротивления материала ослабленного сечения, свободные от выточки части образца работали упруго и равномерно охлаждались (примерно на 0,7–1,1 °С). Из-за локализации деформации в корне выточек нагрев поверхности был относительно небольшим (до 18–40 °С). На кривых изменения температуры поверхности образцов с выточками заметно изменение хода тепловых волн в пределах длины выточки.

Деформирование образцов второй серии происходило при скорости перемещения подвижной траверсы 33,3–98,9 мм/с. Для образцов этой серии отмечается значительное возрастание температуры поверхности (до 71 °С для образца «а»), обусловленное возросшей мощностью деформационных процессов.

**Выводы.** 1. Развитие упругих, упругопластических и пластических деформаций в образцах типа Людвика–Шея сопровождается образованием деформационного тепла. Упругая стадия деформирования характеризуется охлаждением стали образцов на величину порядка 1 °С. Появление упруго-пластических и пластических деформаций сопровождается нагревом деформированного материала образцов. В цилиндрических образцах без концентраторов нагрев на участке образования шейки повышает температуру поверхности образца до 40–100 °С. При увеличении скорости перемещения траверсы от 0,8–1,6 мм/с до 33,3–98,9 мм/с и соответствующем росте деформирования стали происходит нагрев поверхности в 2,5–3 раза, достигая 80–90 °С.

2. Пластическое деформирование гладкого образца развивается постепенно от зон крепления (захватов) к середине по волновому механизму. Каждая волна деформаций сопровождается нагревом-охлаждением, соответственно, в сжатой и растянутой части волны. При деформировании поверхность образца покрывается характерными полосами сдвига.



**Рисунок 6** — Диаграмма растяжения и вид термограмм в характерных точках

3. Выточки с малым уклоном берегов (до 16 %) незначительно сказываются на ограничениях деформаций при образовании шейки. При большем уклоне локализация деформаций в зоне развития шейки происходит в стесненных условиях. В эту зону вытягивается материал из примыкающих к выточке участков. При значительных уклонах берегов или при ступенчатых выточках значительно уменьшается объем деформируемого материала в выточке и соответственно снижается количество тепла, образующегося в этой зоне. Температура поверхности в окрестности а ниже, чем в гладком образце. В зоне шейки величина температуры поверхности на 3–20 °С превышала температуру недеформированного металла. Узкая выточка предопределяла возникновение квазихрупкого излома.

4. Экспериментальные испытания образцов типа Людвика–Шея позволяют определять как механические свойства стали в соответствии с ГОСТ 1497-84, так и их изменения под действием концентраторов напряжений и чувствительность стали к появлению хрупких изломов. Выполнение таких испытаний по стандартным методикам может быть полезно для выявления сопротивления

разрушению металлов в зонах концентраторов при не статическом нагружении (переменные нагрузки, действие низких температур, сейсмические, ударные воздействия и т. д.).

#### Список литературы

1. Ludwik, P. Ueber Kerbwirkungen bei Flußeisen / P. Ludwik, R. Scheu // Stahl und Eisen. — 1923. — No. 31. — Pp. 126–128.
2. Губкин, С.И. Пластическая деформация металлов / С.И. Губкин. — М.; Л.: ОНТИ, 1935. — 418 с.
3. Казарновский, В.С. Работоспособность сварных соединений замкнутых профилей в диапазоне климатических температур: дис. ... д-ра техн. наук / В.С. Казарновский. — Новосибирск: НИИЖТ, 1999. — 290 с.
4. Жильмо, Л. Характеристика свойств конструкционных сталей работой предельной деформации / Л. Жильмо // Современные проблемы металлургии. — М.: Изд-во АН СССР, 1958. — С. 572–582.
5. Иванова, В.С. Природа усталости металлов / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. — М.: Металлургия, 1975. — 456 с.
6. Федоров, В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел / В.В. Федоров. — Ташкент: ФАН, 1979. — 163 с.
7. Петров, А.И. Влияние всестороннего давления на развитие пористости в процессе шейкообразования при растяжении металлов и сплавов / А.И. Петров, М.В. Разуваева // Журнал технической физики. — 2014. — Т. 84, вып. 2. — С. 35–38.

MOYSEYCHIK Aleksandr E.

Graduate Student<sup>1</sup>

E-mail: ja-kytik\_89@mail.ru

VASILEVICH Yuriy V., Dr. Phys.-Math. Sc., Professor

Head of the Department “Resistance of Materials of Mechanical Engineering Profile”<sup>1</sup>

E-mail: vasilevich@bsu.by

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

MOYSEYCHIK Evgeniy A., Cand. Techn. Sc., Associate Professor

E-mail: moisseitchik@mail.ru

Received 01 July 2015.

## DEFORMATION HEATING CYLINDRICAL SAMPLES TYPE LUDWIK–SCHEU TENSILE

*A number of laws of deformation and failure of cylindrical samples such as Ludwik–Scheu are established. It is shown that the samples of smooth deformation heating raises the temperature of the surface to the (40–100) °C. In areas with recesses surge in temperature is much lower due to the smaller volume of a deformable metal. Increase of speed from (0,8–1,6) mm/s up (33,3–98,9) mm/s results in temperature rise of a surface in 2,5–3 times (80–90) °C.*

**Keywords:** deformation, samples with recesses, plastic deformation temperature

#### Reference

1. Ludwik P., Scheu R. Ueber Kerbwirkungen bei Flußeisen. *Stahl und Eisen*, 1923, no. 31, pp. 126–128.
2. Gubkin S.I. *Plasticheskaja defoformacija metallov* [Plastic deformation of metals]. Moscow, Leningrad, ONTI, 1935. 418 p.
3. Kazarnovskij V.S. *Rabotosposobnost' svarnikh soedinenij zamknytykh profilej v diapozone klimoticheskikh temperatur. Diss dokt. tech. nauk* [Performance of welded joints closed profiles in a range of climatic temperatures. Doct. techn. sci. diss.]. Novosibirsk, 1999. 290 p.
4. Jilmo L. *Harakteristika svojstv konstrukcionnih stal'ei rabotoj predelnoj defoformacii* [Characteristic properties of the structural steel work limit strain]. Moscow, AN SSSR, 1958, pp. 572–582.
5. Ivanova V.S. *Priroda ystalosti metallov* [problem of metal fatigue]. Moscow, Metallurgija, 1975. 456 p.
6. Fedorov V.V. *Termodinamicheskie aspekti prochnosti i razrushenija tverdih tel* [Thermodynamic aspects of strength and fracture of solids]. Tashkent, FAN, 1979. 163 p.
7. Petrov A.I. *Vlijanie vsestoronnego davlenija na razvitie poristosti v processe sheikoobrazovanija pri rastjagenii metallov i splovov* [The effect of hydrostatic pressure on the development of porosity in the process of formation Shejko tensile metals and alloys]. *Technicheskaja fizika* [Technical Physics], 2014, vol. 84, no. 2, pp. 35–38.