

## УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГОЕМКОСТЬ И ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ В СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ

Яковлев А. А., Мойсейчик А. Е., Мойсейчик Е. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск

**Введение.** При деформировании растяжением стальных образцов можно выделить четыре стадии их работы (рисунок 1). На первой стадии материал работает упруго. Вторая стадия характеризуется появлением площадки текучести и соответствующей работой на ее протяжении. На третьей стадии образец равномерно деформируется в пределах рабочей зоны  $l$  (рисунок 1). Третья стадия возникает в равномерно деформируемом металле и характеризуется развитием локальной неустойчивости пластического деформирования, внешне проявляющейся в виде локального утонения («шейки»), зарождение и развитие которой происходит в произвольном сечении рабочей длины  $l$  образца. Накапливаемая на каждой стадии в единице объема материала образца механическая энергия (удельная энергоемкость) превращается, в основном, в тепло и рассеивается в металле образца и окружающей среде.

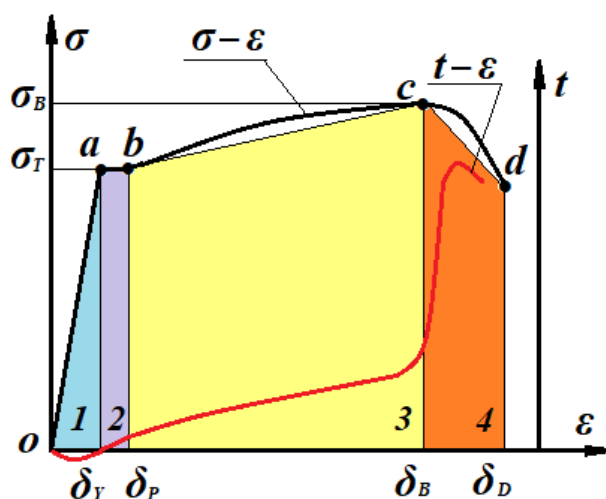


Рис. 1. Схемы диаграмм деформирования образцов « $\sigma$ - $\varepsilon$ » и теплообразования « $t$ - $\varepsilon$ »

Целью настоящей статьи является приближенная расчетно-экспериментальная оценка удельной энергоемкости и теплообразования на каждой стадии работы образца.

**Удельная энергоемкость материала образца на стадиях 1–4** (см. рисунок 1).

Удельная энергоемкость  $a_v$  при упругой работе образца (стадия 1):

$$a_{v1} = \frac{\sigma_T}{2} \delta_Y. \quad (1)$$

На второй стадии –

$$a_{v2} = \sigma_T(\delta_P - \delta_Y). \quad (2)$$

На третьей стадии –

$$a_{v3} = \frac{(\sigma_T + \sigma_B)}{2} (\delta_B - \delta_P). \quad (3)$$

Обозначая разрушающие напряжения на четвертой стадии через  $\sigma_D$  аналогично получаем

$$a_{v4} = \frac{(\sigma_B + \sigma_D)}{2} (\delta_D - \delta_V). \quad (4)$$

Далее, можно в первом приближении определить среднюю температуру стали образцов на каждой из приведенных стадий. Для этого допускаем, что теплообразование происходит за малый промежуток времени, в течение которого стальной образец не обменивается теплотой с окружающим пространством (адиабатический процесс). Тогда изменение температуры на каждом участке диаграммы (рисунок 1) можно приближенно определить по формуле

$$\Delta t = \frac{\beta a_v}{c\rho}, \quad (5)$$

где:  $\beta$  – коэффициент Тейлора-Квинни, являющийся постоянной величиной, лежащей в пределах от 0 до 1;

$c$  – удельная теплоемкость;  $\rho$  – плотность материала.

Коэффициент Тейлора-Квинни имеет сложную природу [1; 2]. При расчетах по формуле (5) будем принимать  $\beta = 0,9$ .

**Образцы, методика их испытания и обработка результатов.** Для квазистатических испытаний на растяжение принимались пропорциональные плоские образцы по ГОСТ 1497 (рисунок 2) двух типов. Первый образец толщиной 20 мм с рабочей длиной  $l_0 = 140$  мм из стали 09Г2С. Второй образец толщиной 7,9 мм с рабочей длиной  $l_0 = 140$  мм из стали ВСтЗсп.

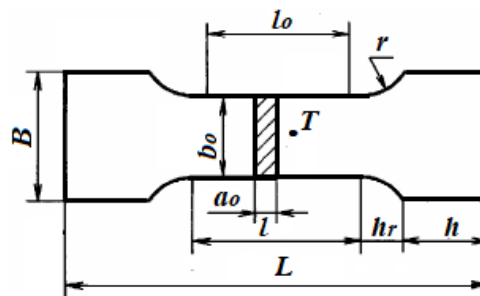


Рис. 2. Схема и характерные размеры экспериментальных образцов

Образцы испытывались на растяжение на электронно-гидравлической сервоприводной универсальной испытательной машине WAW-1000 с микрокомпьютером 100Т. Скорость нагружения  $v$  выдерживалась в пределах  $3 \leq v \leq 9$  Н/мм<sup>2</sup> с. При испытании второй образец нагружался с остановками (перерывами) по 5–7 секунд для контроля трещинообразования в окалине и развития полос Людерса-Чернова в металле. Первый образец нагружался без перерывов. Координаты машинной диаграммы фиксировались в численной форме. Пересчет в координатную систему « $\sigma$ – $\epsilon$ » выполнялся в Excel. В процессе растяжения испытываемые образцы изменяли свое тепловое состояние. Это засвидетельствовали изменения величин температуры в точке  $T$  в средней части образца (рисунок 2). Температуру поверхности измеряли с помощью портативного тепловизора testo 875i. Температурная чувствительность прибора меньше 0,05 °С при 30 °С.

Моделирование работы обоих образцов при упруго-пластическом растяжении производилось с использованием программного комплекса Ansys. При расчете напряженно-деформированного состояния внешняя растягивающая сила  $P_{кр}$ , прикладываемая к торцам образцов определялась как произведение площади опасного сечения на предел текучести материала. Развитие пластических деформаций в образцах наблюдалось при последовательном приложении к образцам следующих величин внешних растягивающих сил:  $0,5P_{кр}$ ,  $0,8P_{кр}$ ,  $P_{кр}$ ,  $1,05P_{кр}$ ,  $1,2P_{кр}$ . Материал представлялся моделью с билинейным изотропным упрочнением. Задача по моделированию тепловыделения при пластическом деформировании рассматривалось как нелинейная. При этом для лучшей сходимости расчетных циклов избегали конечных элементов низкого качества. Для разбивки шагов решения на подшаги использовали опцию Large Deflection. Определение доли накопленной энергии пластической деформации, затрачиваемой на теплообразование в образцах, велось с использованием конечного элемента SOLID226. Также для определения изменения поверхностной температуры при пластической деформации задавались следующие физические характеристики материала: теплопроводность, удельная теплоемкость, коэффициент Тейлора-Квинни.

**Данные эксперимента и конечно-элементного моделирования.** Машинные диаграммы деформирования образцов приведены на рисунке 3. Второй образец был доведен до разрыва, первый – до образования шейки (рисунок 4).

На втором образце заметны полосы скольжения, появившиеся в нем при загрузке на интервале «а–с» (рисунок 4). Разрушение обоих образцов происходило на ниспадающих ветвях машинных диаграмм и сопровождалось развитием локальной неустойчивости пластического деформирования в форме «шейки».

Ход экспериментальных кривых 1 и 3 (рисунок 3) отображает выделенные четыре участка машинных диаграмм. Резкое нарастание выделения тепла происходит на стадии зарождения и развития локальной неустойчивости пластического деформирования. Температура поверхности первого образца (рисунок 3, кривая 4) на этой стадии деформирования достигала  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

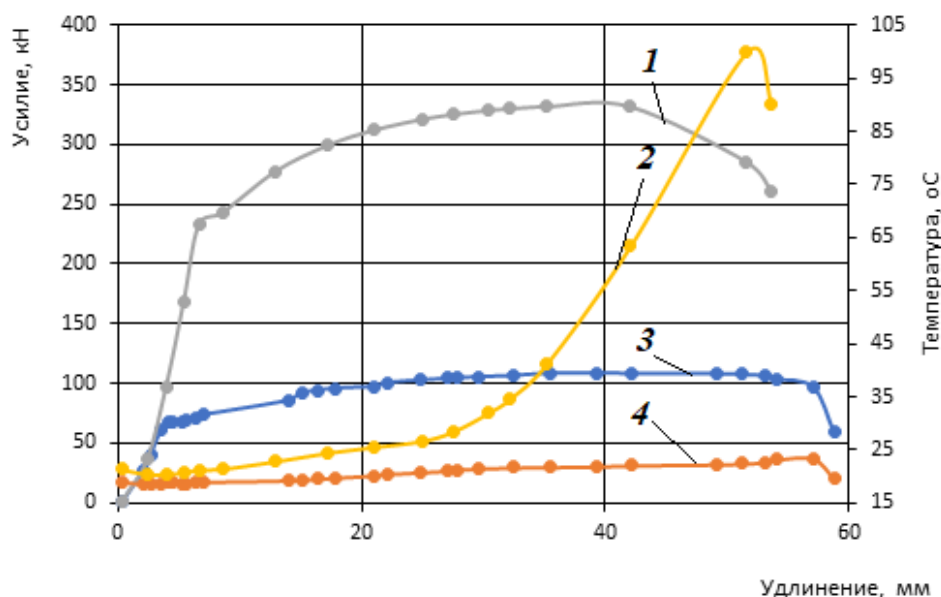


Рис. 3. Машинные диаграммы и изменение температуры поверхности в точке  $T$  пропорциональных образцов при растяжении: 1, 3 – машинные диаграммы «усилие-удлинение» для образцов 2 и 1; 2, 4 – температуры поверхности в опасном сечении образцов 2 и 1



Рис. 4. Вид первого (б) и второго (а) образцов после испытания

Результаты расчета напряженно-деформированного и энергетического состояния образцов приведены на рисунках 5–7. Следует отметить, что в процессе расчета фронт эквивалентных напряжений и пластических деформаций при росте растягивающей силы от  $0,8P_{кр}$  до  $1,05P_{кр}$  для принятой модели образцов распространялся от середины образца к захватам.

Максимальное расчетное значение поверхностной температуры образцов достигало:  $29,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (для первого образца) и  $24,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (для второго образца). Начальная температура образцов задавалась  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

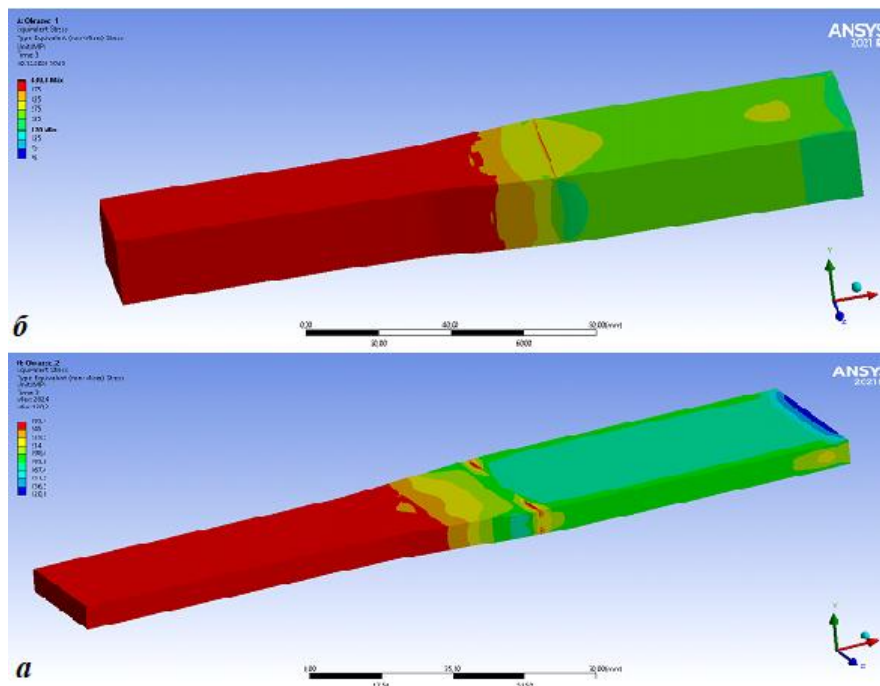


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в первом (б) и втором (а) образцах при нагружении силой равной  $1,05P_{кр}$  (красным цветом выделены напряжения, превышающие  $\sigma_T$ )

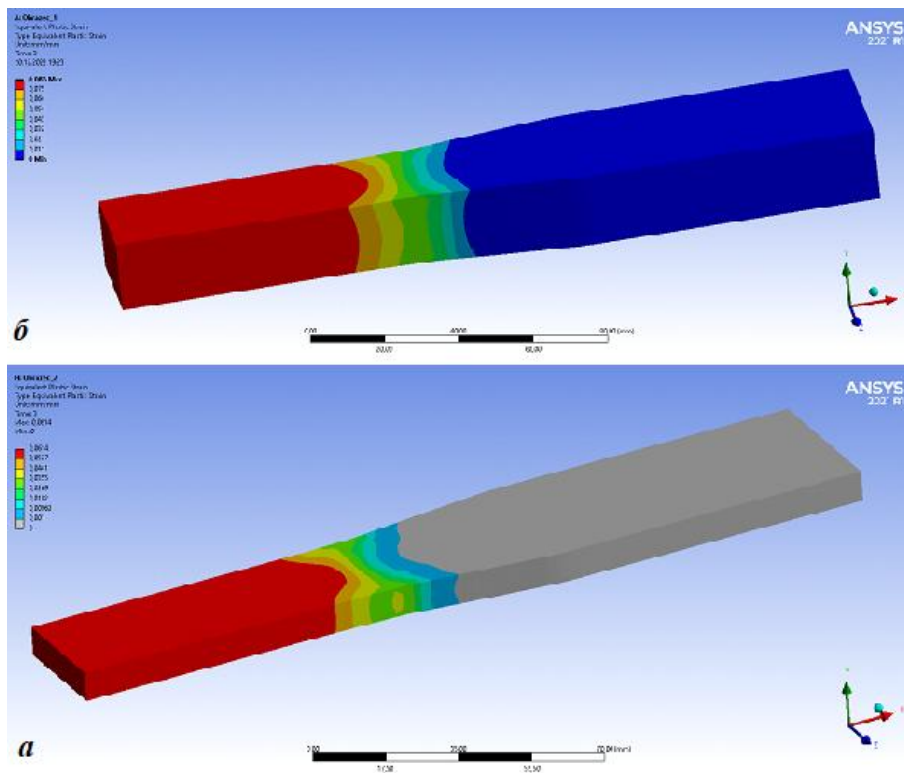


Рис. 6. Распределение эквивалентных пластических деформаций в первом (б) и втором (а) образцах при нагружении силой равной  $1,05P_{кр}$ .

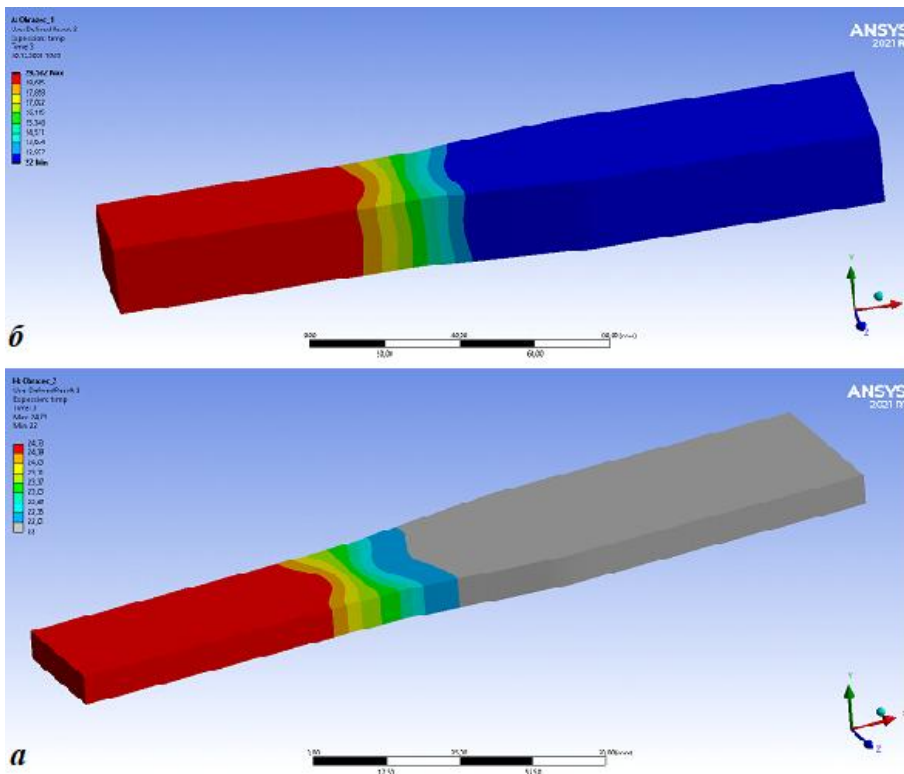


Рис. 7. Распределение поверхностной температуры в первом (б) и втором (а) образцах при нагружении силой равной  $1,05P_{кр}$ .

**Обсуждение результатов.** Из рисунка 3 видно, что наибольшее повышение температуры образцов произошло при образовании и развитии шейки. Так, резкий скачок с 30 °С до 100 °С на температурной кривой 4 (см. 3) произошел за 1/10 всего времени нагружения образца.

Расчетные величины изменения температур  $\Delta t$ , полученные по формулам (1–5) для стадий 1–4 деформирования образцов, приведены в таблице.

Таблица 1 – Расчетные значения изменения температур  $\Delta t$  для стадий 1–4

Стадии деформирования образцов и $\Delta t$ (см. рисунок 1)	Нагрев материала образцов $\Delta t$ при их деформировании на стадиях 1–4, °С			
	I	II	III	IV
Образец 1	1,04	0,92	25,5	10,2
Образец 2	2,34	1,32	24,5	6,75

Сопоставляя данные таблицы с экспериментальными (см. рисунок 3), можно отметить, что соответствующие температуры поверхности образцов 1 и 2 существенно отличаются. Меньшие величины экспериментальных температур для образца 1 объясняются остыванием металла в промежутках между ступенями его нагружения. Таких перерывов при деформировании образца 2 не было. Растяжение образца 2 велось непрерывно вплоть до зарождения трещины скола в шейке. Экспериментальное значение температуры поверхности 2-го образца на 3 стадии деформирования в 4 раза превышало расчетное. Такое расхождение объясняется как приближенностью расчета по формулам 1–5, так и неучетом теплообразования из-за твердотельных реакций в деформируемом металле [3].

#### **Выводы.**

1. Температура нагрева металла деформируемого растяжением стального элемента в первом приближении может быть рассчитана по формулам 1–5 или автоматизированным расчетом с использованием конечно-элементного анализа.

2. Экспериментальные величины температур поверхности при непрерывном квазистатическом деформировании значительно (до 5 раз) превышают их расчетные значения.

3. Фиксирование температурных полей металлических элементов при их деформировании следует выполнять дистанционно, в форме термофильмов, с использованием измерительных инфракрасных приборов.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. A thermodynamic internal variable model for the partition of plastic work into heat and stored energy in metals / P. A. Rosakis [et al.] // Journal of the mechanics and physics of solids – 2000. – V. 48. – P. 581 – 607.

2. Zaera, R. On the Taylor–Quinney coefficient in dynamically phase transforming materials. Application 304 stainless steel / R. Zaera, J. A. Rodriguez-Martinez, D. Rittel. // Int. J. Plasticity (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.08.003>

3. Мойсейчик Е. А. Тепловой контроль материалов, стальных конструкций и машин / Е. А. Мойсейчик. – Минск : Ковчег, 2022. – 200 с.

*Поступила: 13.04.2023*